

SEMICONDUCTOR ELEMENT

Patent Number: JP2003273473
Publication date: 2003-09-26
Inventor(s): YANAGIMOTO TOMOYA
Applicant(s): NICHIA CHEM IND LTD
Requested Patent: JP2003273473
Application Number: JP20020320916 20021105
Priority Number(s):
IPC Classification: H01S5/343; H01L33/00
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To obtain an active layer and an element structure having excellent light emitting efficiency in a short wavelength region of 380 nm in a semiconductor element, particularly in a light emitting element using a nitride semiconductor and a laser element.

SOLUTION: In the semiconductor element of the structure that an active layer 12 of a quantum well structure including a well layer 1 and a barrier layer 2 is sandwiched by a first conductivity type layer 11 and a second conductivity type layer 12, a first barrier layer 2a is provided at the side of the first conductivity type layer 11 and a second barrier layer 2b is provided at the side of the second conductivity type layer 12 sandwiching at least one well layer 1a in the active layer, the second barrier layer 2b has band gap energy which is smaller than that of the first barrier layer 2a and the barrier layer is asymmetry. More preferably, since a carrier confinement layer 28 having the band gap energy larger than that of the first barrier layer 2a is provided in the second conductivity type layer 12, a band structure opposed to a non-symmetrical structure of the active layer is provided in each conductivity type layer sandwiching the active layer.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号
特開2003-273473
(P2003-273473A)

(43) 公開日 平成15年9月26日 (2003.9.26)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テ-マ-コ-ト* (参考)
H 0 1 S 5/343	6 1 0	H 0 1 S 5/343	6 1 0 5 F 0 4 1
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 5 F 0 7 3

審査請求 未請求 請求項の数27 O L (全 33 頁)

(21) 出願番号 特願2002-320916(P2002-320916)

(22) 出願日 平成14年11月5日 (2002.11.5)

(31) 優先権主張番号 特願2001-340078(P2001-340078)

(32) 優先日 平成13年11月5日 (2001.11.5)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願2002-2870(P2002-2870)

(32) 優先日 平成14年1月9日 (2002.1.9)

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000226057

日亜化学工業株式会社

徳島県阿南市上中町岡491番地100

(72) 発明者 柳本 友弥

徳島県阿南市上中町岡491番地100 日亜化学工業株式会社内

(74) 代理人 100074354

弁理士 豊栖 康弘 (外1名)

Fターム(参考) 5F041 AA03 AA40 CA05 CA34 CA40
CA46 CA65

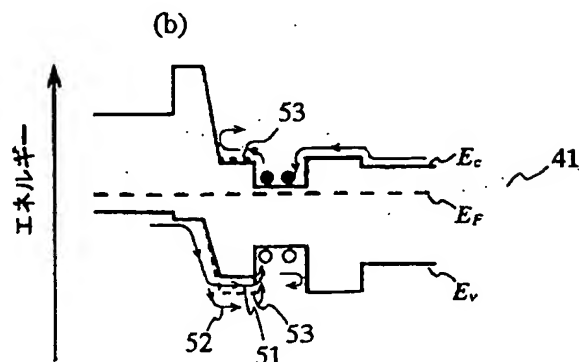
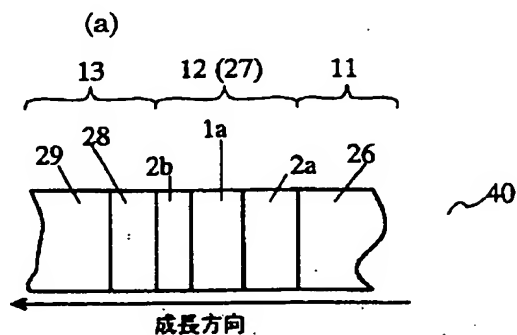
5F073 AA13 AA45 AA47 AA55 AA73
AA74 BA09 CA03 CB02 DA05
EA23 EA28 EA29

(54) 【発明の名称】 半導体素子

(57) 【要約】

【課題】 半導体素子、特に窒化物半導体を用いた発光素子、レーザ素子において、380nmの短波長域における発光効率に優れた活性層、及び素子構造を実現する。

【解決手段】 井戸層1と障壁層2とを有する量子井戸構造の活性層12が、第1導電型層11、第2導電型層12とで挟まれた構造を有する半導体素子において、前記活性層内において、少なくとも1つの井戸層1aを挟んで、前記第1導電型層11側に第1の障壁層2aと、前記第2導電型層12側に第2の障壁層2bと、が設けられると共に、第2の障壁層2bが、第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーが小さく、障壁層が非対称なことを特徴とする。更に好ましくは、第2導電型層12内には、第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーの大きなキャリア閉じ込め層28が設けられることで、活性層を挟む各導電型層に、活性層の非対称構造とは反対のバンド構造が設けられる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 井戸層と障壁層とを有する量子井戸構造の活性層が、第1導電型層、第2導電型層とで挟まれた構造を有する半導体素子において、

前記活性層内において、少なくとも1つの井戸層を挟んで、前記第1導電型層側に第1の障壁層と、前記第2導電型層側に第2の障壁層と、が設けられると共に、第2の障壁層が、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーが小さいことを特徴とする半導体素子。

【請求項2】 前記第1導電型層がn型窒化物半導体を有するn型層であり、前記第2導電型層がp型窒化物半導体を有するp型層であり、前記活性層が窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを有すると共に、第1導電型層、活性層、第2導電型層の順に積層されていることを特徴とする請求項1記載の半導体素子。

【請求項3】 前記活性層内の障壁層として、前記第1の障壁層が、第1導電型層の最も近くに配置され、前記第2の障壁層が、第2導電型層の最も近くに配置された障壁層であることを特徴とする請求項1又は2記載の半導体素子。

【請求項4】 前記第2の障壁層が、活性層内で最も外側に配置された層であることを特徴とする請求項1乃至3記載の半導体素子。

【請求項5】 前記第1導電型層が、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層を有することを特徴とする請求項1乃至4記載の窒化物半導体素子。

【請求項6】 前記第2導電型層が、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの大きなキャリア閉込め層を有することを特徴とする請求項1乃至5記載の半導体素子。

【請求項7】 前記第2導電型層が、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の半導体層を有し、前記キャリア閉込め層を介して活性層から離間されて設けられていることを特徴とする請求項6記載の半導体素子。

【請求項8】 前記キャリア閉込め層に、p型不純物がドーピングされていることを特徴とする請求項6又は7記載の半導体素子。

【請求項9】 前記第1の半導体層及び／又はキャリア閉込め層が、活性層に接して形成されていることを特徴とする請求項6乃至8記載の半導体素子。

【請求項10】 前記第1の障壁層と、第2の障壁層とのバンドギャップエネルギー差が、0.02eV以上であることを特徴とする請求項1乃至9記載の窒化物半導体素子。

【請求項11】 前記活性層が、井戸層を複数有する多重量子井戸構造であり、前記第1の障壁層と第2の障壁層との間に、第1の障壁層、第2の障壁層と井戸層を介して配置された内部障壁層を有し、該内部障壁層が、第

2の障壁層とバンドギャップエネルギーが異なることを特徴とする請求項1乃至10記載の窒化物半導体素子。

【請求項12】 前記内部障壁層が、第2の障壁層よりもバンドギャップエネルギーが大きいことを特徴とする請求項11記載の窒化物半導体素子。

【請求項13】 前記第1の障壁層が、前記内部障壁層よりもバンドギャップエネルギーが大きいことを特徴とする請求項1又は12記載の窒化物半導体素子。

【請求項14】 前記活性層が、窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを有し、第1導電型層が窒化物半導体を有し、第2導電型層が窒化物半導体を有する半導体素子において、

前記井戸層が、Ga_{1-x}N若しくは、Ga_{1-x}Nよりもバンドギャップエネルギーの大きなAlを含む窒化物半導体からなることを特徴とする請求項1乃至13記載の半導体素子。

【請求項15】 前記井戸層の組成が、Ga_{1-x}N、Al_xGa_{1-x}N (0<x≤1)、Al_xIn_yGa_{1-x-y}N (0<x≤1、0<y≤1、x+y<1)のいずれかであることを特徴とする請求項14記載の半導体素子。

【請求項16】 前記障壁層の組成が、Al_uIn_vGa_{1-u-v}N (0<u≤1、0≤v≤1、u+v<1)であることを特徴とする請求項14又は15記載の半導体素子。

【請求項17】 前記活性層が、窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを有し、第1導電型層が窒化物半導体を有し、第2導電型層が窒化物半導体を有する半導体素子において、

前記井戸層の組成が、In_zGa_{1-z}N (0<z<1)であり、前記障壁層の組成が、Al_uIn_vGa_{1-u-v}N (0<u≤1、0≤v≤1、u+v<1)であることを特徴とする請求項1乃至13記載の半導体素子。

【請求項18】 前記第1の障壁層のAl混晶比uと、前記井戸層のAl混晶比xとの差が0.1以上、u-x≥0.1であることを特徴とする請求項14乃至17記載の半導体素子。

【請求項19】 前記第1の半導体層、第2の半導体層の少なくとも一方が、Alを含む窒化物半導体からなることを特徴とする請求項14乃至18記載の半導体素子。

【請求項20】 前記第1の障壁層の膜厚が、前記第2の障壁層の膜厚よりも小さいことを特徴とする請求項6乃至19記載の半導体素子。

【請求項21】 前記第1の障壁層の膜厚が30Å以上150Å以下の範囲であることを特徴とする請求項1乃至20記載の窒化物半導体素子。

【請求項22】 前記第2の障壁層の膜厚が50Å以上300Å以下の範囲であることを特徴とする請求項1乃至

至21記載の窒化物半導体素子。

【請求項23】 前記第1導電型層、第2導電型層内に、前記第1の半導体層、第2の半導体層を介し、活性層から離間して、クラッド層がそれぞれ設けられていると共に、

第1導電型層内のクラッド層が第1の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きく、第2導電型層内のクラッド層が第2の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きいことを特徴とする請求項6乃至22記載の半導体素子。

【請求項24】 前記第1導電型層、第2導電型層にそれぞれ設けられた光閉込めのクラッド層に挟持された活性層により導波路が形成された発光素子において、第1導電型層内に設けられた光ガイド層が、前記第1の半導体層を有することを特徴とする請求項5乃至22記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項25】 前記第2導電型層内に設けられた光ガイド層が、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の半導体層を有することを特徴とする請求項24記載の半導体発光素子。

【請求項26】 前記第1の半導体層、第2の半導体層の少なくとも一方が、Alを含む窒化物半導体からなり、該Alを含む窒化物半導体のAl混晶比が、前記窒化物半導体からなる第1の障壁層のAl混晶比よりも小さいことを特徴とする請求項24又は25記載の窒化物半導体素子。

【請求項27】 前記第1の障壁層が、前記クラッド層よりもバンドギャップエネルギーが大きいことを特徴とする請求項23乃至26記載の窒化物半導体素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は半導体素子、発光素子に係り、特に窒化物半導体からなる量子井戸層を活性層とする窒化物半導体を用いた発光素子に関する。

【0002】

【従来の技術】 発光素子としては水銀ランプの代替品として白色LEDの提供、ホトリソグラフの高精度化等の要求により、より短波長、およそ375nm以下の発光波長のLED、発振波長のLDの提供が望まれている。

【0003】 他方、GaN系発光素子としては、InGaNを活性層とするものの発光効率の良さから、多くのInGaNを活性層とする発光素子が現在汎用されており、このInGaNを活性層とする発光素子では上記短波長の発光を実現するためには、Inの組成比を少なくする必要がある。しかしながら、Inの組成比の減少に伴って、効率良くInGaNが発光しなくなり、閾値電流が増加し、その結果、レーザ発振が380nm以下では特に顕著な閾値の上昇が現れるという問題が発現することとなった。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】 本発明はレーザ発振が380nm以下では特に顕著な閾値の上昇が現れるという問題の原因を解明し、その解決手段を提供することを目的とする。

【0005】 また、AlGaNなどのAlを含む窒化物半導体を素子に用いる場合において、他のAlを含まない窒化物半導体に比べて、熱膨張係数差、弾性が大きく異なり、Alを含む窒化物半導体を用いると、クラックの発生しやすく、クラックの発生は他の結晶性と異なり、素子破壊となるものであり、クラックの発生を防止しなければ、窒化物半導体素子として動作しないものとなる。このため、上述した380nm以下の発光波長の活性層を用いた発光素子、レーザ素子においては、Alを含む窒化物半導体は窒化物半導体においてバンドギャップエネルギーを大きくすることができると、活性層、それよりもバンドギャップエネルギーの大きな、キャリア閉込め層、光ガイド層、光閉込め層などに用いられる。すなわち、上記短波長域の発光素子において、Alを含む窒化物半導体は、各層に多層された構造となるが、一方で上述したクラック発生の問題が深刻なものとなり、このため、短波長化とクラック発生防止とは排他的な関係となる傾向にあり、窒化物半導体の発光素子において、さらなる短波長化の深刻な障害となる。さらに、短波長化において、GaNは365nmに光の吸収端を有し、それよりも10nmほど波長の長い領域でも高い吸収係数を有することから、上記380nm以下の短波長域での発光素子、レーザ素子への使用が困難となる。

【0006】 加えて、上述したように発光素子、レーザ素子における活性層は、その発光効率、内部量子効率がその結晶性に大きく依存することから、活性層の下に配置される導電型層の結晶性が素子特性向上に極めて重要な要因となる。通常、窒化物半導体発光素子は、n型層、活性層、p型層の順に積層された構造を有しているが、この場合n型層の結晶性を良好なものとする必要がある。一方で、上述したように、Alを含む窒化物半導体が、他のAlを含まない窒化物半導体に比べて、大きく結晶性が悪化する傾向にあり、従来はこのような問題を回避する目的で、Alを含む窒化物半導体の下地層としてInを含む窒化物半導体層を用いて、熱膨張係数差による内部応力の発生を緩和したり、Alを含む窒化物半導体層に隣接して、GaNなどのAlを含まない窒化物半導体を設けて結晶性の回復、内部応力の緩和を実現して、レーザ素子などのAlを含む窒化物半導体層を素子構造に設けた構造で素子を実用的に動作可能なものとしていた。しかし、上記短波長の発光素子、レーザ素子において、Alを含まない窒化物半導体は、光吸収層となり、素子構造に用いることが好ましくなく、そのため素子構造は、ほとんどがAlを含む窒化物半導体層を用いることとなり、上述した結晶性、クラックの発生によ

り、実用的なしきい値、 V_f 、発光効率の発光素子、レーザ素子が得られず、特に光ガイド層、光閉込めのクラッド層などにA1混晶比の大きいA1を含む窒化物半導体を多用したレーザ素子においては、室温において連続発振可能なレーザ素子が得られなかった。

【0007】

【課題を解決するための手段】本発明は上記事情に鑑みなされたものであり、バンド構造、組成に非対称性を有する素子構造により上記課題を解決できることを見だし、短波長の半導体発光素子などのA1を含む窒化物半導体を用いた素子において、上記結晶性、クラック発生の問題を回避して、短波長域の発光素子、導波路を有するレーザ素子にも用いることができる素子構造を得るものである。特に、窒化物半導体のように、ホールと電子のキャリア特性が大きく異なる系において、活性層への優れたキャリア注入効率を実現して、好適に活性層にキャリアを閉じ込めて、発光効率に優れるバンド構造、組成が非対称な素子構造を用いるものであり、また短波長の窒化物半導体発光素子において、結晶性、素子特性に優れた導波路構造を提供するものである。

【0008】井戸層と障壁層とを有する量子井戸構造の活性層が、第1導電型層、第2導電型層とで挟まれた構造を有する半導体素子に係るものであり、レーザ素子、端面発光素子とする場合には、図2(a)に示すように下部光ガイド層26、上部光ガイド層29との間に活性層27が設けられた導波路を有するものであり、その場合光閉込めのクラッド層25、30が、光ガイド層よりも活性層から離れて形成され、上部クラッド層30と活性層27の間に上部光ガイド層29、下部クラッド層25と活性層27との間に光ガイド層が設けられた構造となる。他方、本発明が発光素子の場合には、図6(a)及び図6(b)に示すように、第1導電型層として、キャリア注入、キャリア閉込め層となる層202が設けられ、第2導電型層として、キャリア注入層205、キャリア閉込め層204が、それぞれ設けられ、第1導電型層が第2導電型層のように、キャリア閉込め層とキャリア閉込め層とがことなる層で構成されていても良く、第2導電型層が、キャリア注入とキャリア閉込めを兼ねる層とした構造でも良い。

【0009】前記活性層27が前記障壁層2として、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、少なくとも1つの井戸層1を挟むように、第1の障壁層、第2の障壁層が設けられ、前記第1導電型層側に第1の障壁層と、前記第2導電型層側に第2の障壁層と、が設けられると共に、第2の障壁層が、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーが小さいことを特徴とする。具体的には、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すものであり、活性層内で、井戸層で離間され、第1導電型層側、第2導電型層側に配置された第1の障壁層2a、第2の障壁層2bと

の間に少なくとも1つの井戸層1が設けられ、第2の障壁層2bのバンドギャップエネルギーを、第1の障壁層2aのバンドギャップエネルギー（図中の点線53）より小さくすることで、図中の従来のキャリアの経路52よりも第2導電型層側からのキャリア注入を促進できる本願の経路51を形成し、すなわち、電位障壁を小さくして、キャリアの活性層及び井戸層への注入効率を高めた構造とするものである。特に、窒化物半導体において、n型層側を第1導電型層、p型層側を第2導電型層、とした構造において、ホールの拡散長が電子に比べて小さく、p型キャリアの活性化率も小さい窒化ガリウム系半導体材料では、ホールの井戸層への注入が効率的にでき、発光効率、閾値電流密度の低減が可能となり好ましい。また、短波長域の窒化物半導体を用いた発光素子、レーザ素子にあっては、図2(b)に示すように、従来の第1の障壁層2aとほぼ同じA1混晶比（点線部50）よりも、A1混晶比の小さい層として第2の障壁層2bが活性層内に設けられることで、結晶性低下を防止し、一方で、第1の障壁層よりもA1混晶比の小さい第2の障壁層が設けられることで、両者に挟まれた井戸層において、下界面と上界面に異なる応力が加わり、A1を含む窒化物半導体による圧電界を小さくし、バンドギャップのひずみを低減できると考えられ、井戸層における発光効率を向上できる傾向にある。

【0010】第1導電型層が、n型層であり、前記第2導電型層が、p型層であると共に、第1導電型層、活性層、第2導電型層の順に積層されていることで、実施例に示すように、良好な発光素子を得られ、また、第1導電型層がn型の窒化物半導体層を有し、第2導電型層がp型の窒化物半導体層を有する窒化物半導体素子においては、上述したように、各キャリア特性を活かして、p型層となる第2導電型層から活性層へのキャリアの注入を好適なものとできる。また、A1を含む窒化物半導体を多用する短波長系の発光素子において、活性層上方に位置する第2の障壁層のA1混晶比を、下方の第1の障壁層より小さくでき、活性層の上に形成されるp側層の結晶性を良好なものとできる。

【0011】上記第1の障壁層、第2の障壁層の活性層内での配置において、前記活性層内の障壁層として、前記第1の障壁層が、第1導電型層の最も近くに配置され、前記第2の障壁層が、第2導電型層の最も近くに配置された障壁層であることにより、上述した第2の障壁層による第2導電型層からのキャリア注入効率向上、第1の障壁層によるそのキャリアの閉込め効果を高めた構造とでき、第1の障壁層、第2の障壁の各機能を高めることができる。

【0012】また、図5(a)及び図5(b)に示すように、第2の障壁層2bが活性層12内において最も外側に配置された層であることで、図4(b)に示すように、第2の障壁層2bより外側に井戸層などがある場合

に比べて、上記キャリアの注入口としてのキャリア注入を促進する作用が好適に発現され好ましい。更に好ましくは、活性層内で最も外側の層として、第1の障壁層があることで、その効果が最大限に発揮できる量子井戸構造の活性層となる。すなわち、活性層内で、最外殻に位置する第1の障壁層、第2の障壁層との間に設けられた井戸層内に、効率的にキャリア注入閉込めを実現できる。

【0013】前記第1導電型層に、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層を有することを特徴とする。従来、短波長の発光素子であるAlGaIn系活性層において、それを挟み、キャリア注入層となる各導電型の層には、井戸層よりも大きなバンドギャップエネルギーが通常必要とされるが、この構成では、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、活性層12内の第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層26を第1導電型層11に設けることで、結晶性良く活性層を形成し、なおかつ、第1の障壁層2aでもって、第2導電型層11からのキャリアを井戸層内に閉じ込める働きを有する新規な素子構造を提供するものとなる。この構成において、特に効果的であるのは、上述した短波長系の発光素子において、活性層を挟む層のAl混晶比を小さくできることである。この時、井戸層については、少なくともGaInと同じか、それよりも大きなバンドギャップエネルギーを持つAlを含む窒化物半導体を用い、図2(b)に示すように、第1の障壁層2aのAl混晶比より小さいAl混晶比で第1の半導体層26を形成し、具体的には上記組成のものを用いることができる。第1の障壁層についても、上記組成の窒化物半導体を用いることができる。第1の半導体層については、好ましくは井戸層よりもバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体を用いることで、活性層及び井戸層への良好なキャリア注入層として機能し、具体的にはAlを含む窒化物半導体が用いられ、好ましくは $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x < 1$)を用いると好ましい結晶性で活性層が形成できる。

【0014】上記構成に加えて、更に好ましくは、第2導電型層内に、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの大きなキャリア閉込め層を設けることで、第1導電型層からのキャリアを好適に活性層内へ閉じ込める構造の素子とできる。これは、上述したように、活性層内の第2導電型層側に配置された第2の障壁層2bが、第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーが小さく、第1導電型層からのキャリアが井戸層を越えるものに対して、閉込めとなる障壁としての機能が小さいためであり、このため第2の障壁層2bでキャリアのオーバーフローを防止するために、図3(a)、図3

(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、活性層12外部に、キャリア閉込め層29を第2導電型層1

3内に設けることでこの問題を解決できる構造となる。この時、更に好ましい構成として、前記第1導電型層がn型であり、前記第2導電型がp型であることを特徴とする。すなわち、この構成により、窒化物半導体のようにキャリア特性が異なる系において、上記第1の障壁層はホールの閉込めとして活性層内で機能させることを特徴としていることで、井戸層に近い位置でのキャリア閉込めを実現し、上記第1の半導体層では、第1導電型層の電子(第1導電型のキャリア)注入として機能させ、キャリア拡散長の大きなものを、第2の障壁層と、活性層外部に配置されたキャリア閉込め層によって、第2の障壁層からキャリア閉込め層の間に、第1導電型層のキャリアを閉じ込める構造とできる。逆に、第2の障壁層を、第1導電型層からのキャリアを十分に閉じ込められる障壁とすることでは、本発明のバンドギャップエネルギーの小さい第2の障壁層によるキャリア注入効果を低減されるものとなり、窒化物半導体のように、ホールと電子の拡散長、キャリア濃度が大きく異なる系において、活性層の機能を低下させるものとなる。このため、活性層外部に、キャリア閉込め層を設けて、活性層内でバンドギャップエネルギーが異なる第1の障壁層、第2の障壁層とで構成された非対称な活性層と組み合わせると、上述した本願発明の効果を好適に発現でき好ましい。

【0015】上記キャリア閉込め層に、p型不純物がドーピングして、第2導電型層とすることで、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すようにバイアス時に、キャリア閉込め層がn型層となる第1導電型層からのキャリアに対して大きな障壁として活性層に隣接して形成されることとなり、活性層内にキャリアのオーバーフローを防ぐ構造とできる。逆に、p型不純物ドーピングのキャリア閉込め層を活性層内に設けると、活性層内部において、pn接合部が形成され、活性層の機能を低下させるものとなる。すなわち、活性層に隣接したキャリア閉込め層付近で、p-n接合部を形成することで、第1導電型層からのキャリアを好適に活性層内に閉じ込める障壁としての機能を最大限に発現させ、一方で、第1の障壁層により第2導電型層からのキャリアを閉じ込める非対称な素子構造とすることにより、窒化物半導体において好適な素子構造が形成される。

【0016】上記キャリア閉込め層は、好ましくは、活性層に接して設けられると、第1導電型層からのキャリアを活性層に接近して閉じ込めることができ、また第1の半導体層が活性層に接することにより効率的なキャリアの注入が実現でき、好適な活性層へのキャリア注入が可能となる。

【0017】更に、前記第1の障壁層と、第2の障壁層とのバンドギャップエネルギー差が、0.02eV以上となるように各障壁層を設けることが好ましい。これは、第1導電型層からのキャリアには、上述したキャリ

ア閉込め層、若しくはクラッド層などのように、活性層外部でのキャリア閉込め機能を大きくした構造とし、第2導電型層からのキャリアについては、第1の障壁層2aでもって、井戸層へのキャリア閉込めを実現するというキャリア閉込め構造の非対称性を強めて、上述した効果を良好なものとでき好ましい。すなわち、第1の障壁層による第2導電型層からのキャリア閉込め機能、小さい障壁の第2の障壁層を越えて井戸層へ第2導電型層からのキャリア注入を高める効果を、更に好ましいものとするためである。

【0018】上記構成に加えて、前記第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の半導体層を有し、前記キャリア閉込め層を介して活性層から離間されて設けられている構造とすることである。この第2の半導体層は、第1の半導体層に対応するものであり、特に第1導電型層がn型層で、第2導電型層がp型層である場合に、第1導電型層からのキャリアを閉じ込めるキャリア閉込め層を介して、設けられることで活性層内への良好な閉込めを実現して、且つ上述したように、バンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層と同様な効果を有することができる。

【0019】また、上記活性層の量子井戸構造の形態として、前記活性層が、井戸層を複数有する多重量子井戸構造である場合には、図5(a)及び図5(b)に示すように、前記第1の障壁層2aと第2の障壁層2bとの間に、第1の障壁層2a、第2の障壁層2bのそれぞれと井戸層1を介して配置された内部障壁層を設けて、その内部障壁層2c、2dが、第2の障壁層2bとバンドギャップエネルギーが異なる構造とすることが好ましい。内部障壁層2c、2dは、図5(a)及び図5

(b)の2c、2dとして示すように、前記第1の障壁層2aと第2の障壁層2bとの間に設けられ、更に第1の障壁層2a、第2の障壁層2bとは井戸層1a、1bを介して設けられるものであり、この内部障壁層を第2の障壁層2bと異なるバンドギャップエネルギーとすることで、図中の矢印に示すように、各井戸層へのキャリアの分配としての機能を高めると共に、外側に配置された第1、2の障壁層と異なる機能を有するものとする。これにより、上述したような第1、2の障壁層の機能も高めることができる。この時、好ましくは、図5

(b)に示すように、内部障壁層が、第2の障壁層よりもバンドギャップエネルギーが大きいものとする。第2導電型層からのキャリアが、第1導電型層側に近づくにつれて、内部障壁層、第1の障壁層を経ることとなり、段階的に大きな障壁が形成され、すなわち、第2導電型層から遠ざかるに従って、段階的にキャリア閉込めが大きくなる構造とでき、その障壁層に近接する各井戸層に好適にキャリアを分配する構造とできる。第1の障壁層近くの井戸層へ、キャリアを注入する効率を高めて、その結果、各井戸層に多くのキャリアを注入でき

る構造となる。

【0020】そのため好ましくは、第1の障壁層が、前記内部障壁層よりもバンドギャップエネルギーが小さいものとする。図5(a)及び図5(b)に示すように、上述した第2の障壁層の障壁を小さくしたことによる第2導電型層からのキャリア注入を高める機能と、内部障壁層による各井戸層へのキャリア注入する機能の両者を高めることができる。更に、バンドギャップエネルギーにおいて、第1の障壁層よりも内部障壁層を小さくし、内部障壁層よりも第2の障壁層を小さくすることで、図5(b)に示すように、第2導電型層からのキャリア注入に対し、第2導電型層から遠くなるに従って、バンドギャップエネルギーが大きくなるように各障壁層が設けられた構造となり、上述したように、各障壁層の機能を高めて、それぞれで異なる機能を持たせて機能分離した活性層とできる。

【0021】内部障壁層の膜厚としては、活性層内において内部障壁層よりも外側に配置された第1の障壁層、第2の障壁層に比べて、ほぼ同等とすることも、異なる膜厚とすることもできるが、好ましくは、第1の障壁層、第2の障壁層の少なくとも一方より膜厚を小さくする。これは、上述したように井戸層の間に形成される内部障壁層は、外部に形成される第1、2の障壁層と異なる機能を有していることに起因し、内部障壁層を厚くすると、障壁機能が強くなり、各井戸層へのキャリア注入が均等になることを阻害する傾向にあると考えられ、膜厚を外部の障壁層よりも小さくして、各井戸層へのキャリア注入・分配効率を高め、活性層全体の再結合効率が高められると考えられる。また、井戸層と障壁層との間に係る応力を考慮すると、井戸層間に配置される内部障壁層が厚くなると、両者でA1混晶比が異なることによる井戸層への内部応力の悪影響が強くなり、井戸層の機能低下の原因となると考えられ、またA1含有の窒化物半導体による強い圧電により、井戸層に悪影響を及ぼすと考えられるからである。更に、内部障壁層を厚膜とすると、活性層全体の膜厚が大きくなり、A1を含む窒化物半導体を用いる活性層では、そのことによる結晶性悪化も、素子特性悪化に深刻な影響を及ぼすこととなる。

【0022】この時、内部障壁層が複数、例えば図5(b)において、ある内部障壁層2cと井戸層1bを介して配置された別の障壁層2dが設けられる形態である場合には、少なくとも1つの内部障壁層が、外部の第1、2の障壁層の少なくとも一方よりも膜厚を小さくすることであり、好ましくは全ての内部障壁層が、第1、2の障壁層の少なくとも一方より膜厚を小さくすると上記内部障壁層の機能を高め、外部の障壁層と機能分離傾向が強くなり好ましい。また、最近接の井戸層間に組成の異なる障壁層が複数設けられる形態においては、その複数の障壁層の内、少なくとも1つの障壁層が、外部の障壁層の少なくとも一方よりも膜厚が小さくすることで

あり、好ましくは井戸層間の障壁層の総膜厚、すなわち最近接の井戸層間の距離、が、外部の障壁層の少なくとも一方よりも膜厚が小さくすることで、最近接の井戸層間に配置された複数の障壁層全体としての機能を向上させることができる。

【0023】内部障壁層の不純物濃度としては、外部に配置された第1の障壁層、第2の障壁層と同様に、各導電型のドーパントとなるn、p型不純物の一方、両方が添加されていても、実質的にドーパントを含まないアンドープで形成しても良い。好ましくは、第1導電型層がn型層、第2導電型層がp型層である場合に、内部障壁層には、第1の障壁層と同様に、n型不純物がドーブされることが好ましい。これは、窒化物半導体のように、電子とホールとの拡散長、キャリア濃度、移動度が大きく異なる材料系においては、特に有効であると考えられ、活性層内において、p型層（第2導電型層）の近くまで、n型キャリアが存在することで、p型層近傍まで、活性層の奥深くまで効率的なn型層からのキャリア注入が可能となるためと考えられる。また、第2導電型層には活性層近傍に、キャリア閉込め層が形成され、この層近くで、pn接合が形成されるため、電子がpn接合付近まで効率的に注入される形態とでき、活性層での結合効率を高めることができる。このとき、井戸層間が複数設けられ、内部障壁層が複数設けられる形態においては、少なくとも1つの内部障壁層にn型不純物がドーブされることが好ましく、更に好ましくは後述するように、n型層側に配置された内部障壁層から順にn型不純物がドーブされ、複数の内部障壁層にドーブされることであり、全ての内部障壁層にn型不純物をドーブすることが最も好ましい。

【0024】井戸層の不純物濃度としては、後述するように、n型不純物が低濃度でドーブされること、具体的には、第1導電型層がn型層である場合に、第1の障壁層よりも、n型不純物濃度を小さくすることが好ましい。また、第1導電型層がn型層である場合に、第1の障壁層と第2の障壁層のn型不純物濃度としては、後述するように、第2の障壁層のn型不純物濃度を、第1の障壁層よりも小さくすることで、n型層（第1導電型層）からのキャリア注入が効率的となり、また第2の障壁層においてp型層（第2導電型層）からのキャリア注入を阻害せず、効率的な注入が可能となる傾向にあり好ましい。

【0025】また、各導電型層に、光ガイド層を有し、図8(b)～図8(d)に示すように、各導電型のドーパントとなる不純物濃度が層内で異なる場合に、第1の障壁層のドーパント量、具体的には第1導電型層がn型層である場合に、n型不純物濃度を、第1導電型層内の光ガイド層における低濃度不純物領域よりも、高濃度にドーブされることが、第1の障壁層による活性層へのキャリア注入効率を高める効果、低濃度不純物領域による

光損失低減の効果、を向上させることができ好ましい。また、p型層側、すなわち、第2導電型層においては、光ガイド層よりも高濃度にp型層がドーブされるキャリア閉込め層からの拡散により、第2の障壁層にp型不純物がドーブされる場合には、光ガイド層の低濃度不純物領域よりも大きくなる傾向にある。これは、低濃度不純物領域の膜厚よりもキャリア閉込め層が小さくなるため、平均の不純物濃度と比較すると第2の障壁層の濃度が大きくなることにあり、また、活性層内に配置され、膜厚の小さい第2の障壁層においては、光の損失への影響が小さく、p型層からのキャリア注入へ寄与する効果が得られ好ましい。

【0026】以上の素子構造において、前記活性層が、窒化物半導体からなる井戸層と障壁層とを有し、第1導電型層が窒化物半導体を有し、第2導電型層が窒化物半導体を有する窒化物半導体を用いた半導体素子において、上述したように、井戸層がGaNよりもバンドギャップエネルギーの大きなAlを含む窒化物半導体となるような短波長系の発光素子において極めて有用な素子構造となる。すなわち、活性層外部で挟む第1導電型層内の第1の半導体層、第2導電型層内の第2の半導体層が、従来よりもバンドギャップエネルギーの小さいものとして形成されるため、各層に用いられるAl混晶比を低く抑えた構造とでき、結晶性悪化、内部応力を抑えた素子構造とできる。この時、窒化物半導体からなる井戸層の具体的な組成としては、 GaN 、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$)、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 < y \leq 1$, $x + y < 1$) で表される組成の窒化物半導体のいずれかを用いることが好ましい。これは、2元混晶のGaNである場合には、成長時に構成元素が少ないため元素同士の反応がなく成長でき結晶性を良好なものとでき、3元混晶の $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$) とすればGaNよりも短波長の発光波長が得られ、更に構成元素が少ないことから元素同士の反応を抑えて結晶性良く成長でき、4元混晶の $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 < y \leq 1$, $x + y < 1$) であれば、Inを含むことにより、発光効率を高めた井戸層とでき好ましい。この時、障壁層の組成として、具体的には、 $Al_uIn_vGa_{1-u-v}N$ ($0 < u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$, $u + v < 1$) で表される窒化物半導体を用いることができる。障壁層は井戸層よりもバンドギャップエネルギーが大きいため、上記組成の井戸層にあつては、井戸層のAl混晶比xよりも、障壁層のAl混晶比uが大きくなるように ($x < u$)、窒化物半導体を用いることとなる。この時、好ましくは、前記第1の障壁層のAl混晶比uと、前記井戸層のAl混晶比xとの差が0.1以上、 $u - x \geq 0.1$ とする。これは、上記短波長系の窒化物半導体素子において、上述した第1の障壁層によるキャリア閉込め機能を好適に発現させるために、0.1以上のAl混晶比の差でもって、Al

を含む窒化物半導体を用いることで、好適な障壁が形成される。また、A1混晶比の差($u-x$)の上限としては、0.5以下とすることで、A1混晶比が高い障壁層を設けることによる結晶性の悪化を抑え、0.3以下とすることで、結晶性の悪化を抑えて良好な井戸層の形成が可能となる。また、A1を含む窒化物半導体からなる第1の障壁層、第2の障壁層において、第1の障壁層のA1混晶比 u_1 と第2の障壁層のA1混晶比 u_2 との差、 u_1-u_2 、としては、0.02以上($u_1-u_2 \geq 0.02$)、好ましくは、0.05以上($u_1-u_2 \geq 0.05$)とすることである。第1の障壁層と第2の障壁層とのA1混晶比の差が、0.02以上であると、上述した第1の障壁層によるキャリア閉込め機能を発現でき、好ましくは0.05以上とすることで、それを好適なものとする。すなわち、第1の障壁層のA1混晶比を大きくして、バンドギャップエネルギーを大きくするほど、好適なキャリア閉込めを実現でき、また第2の障壁層のA1混晶比を小さくして、バンドギャップエネルギーを小さくするほど、キャリア注入効率が増し、素子特性を向上させることができる。

【0027】また、上記窒化物半導体を用いた素子において、第1の半導体層、第2の半導体層の少なくとも一方が、A1を含む窒化物半導体からなる材料を用いることが好ましい。これにより、上記組成の井戸層、障壁層を用いる場合に、これらを有する活性層を挟む層内に、A1を含む窒化物半導体からなる第1の半導体層、第2の半導体層を設けることで、上述した短波長系の窒化物半導体素子において、活性層を挟む各導電型層内のA1混晶比を低減した結晶性に優れる素子構造の形成が可能となる。

【0028】また、上述した前記第1の障壁層の膜厚を、前記第2の障壁層の膜厚よりも小さくすることで、上述した第1の障壁層によるキャリア閉込め、第2の障壁層によるキャリア注入を好適なものとし、なおかつ、井戸層の結晶性を良好なものにできる。これは、第1導電型層、活性層、第2導電型層の順に積層された素子において、第1の障壁層の膜厚を大きくすると、その上に形成される井戸層の結晶性を悪化させるためであり、また、第2の障壁層の膜厚を第1の障壁層よりも大きくすることで、近接して設けられる上記キャリア閉込め層による活性層への悪影響を小さくすることができる。具体的には、上述した短波長系の窒化物半導体において、バンドギャップエネルギーが大きなキャリア閉込め層にはA1混晶比の大きな窒化物半導体を用いられるが、素子駆動時において、高抵抗な層となり、発熱により近接する活性層に悪影響を及ぼすこととなり、また、p型不純物がドーピングされたキャリア閉込め層の場合には、p-n接合部が活性層近傍に形成され、それによる活性層への悪影響を防ぐことによるものである。これは、第2の障壁層が、井戸層とキャリア閉込め層との間

に設けられ、上記悪影響を回避するスペーサーとしての機能を有することによるものであり、それにより、第1の障壁層よりも大きな膜厚の第2の障壁層を形成することで、活性層の機能を高めた素子構造とできる。一方、第1の障壁層は、膜厚が大きくなりすぎると、第1導電型層側からのキャリアの注入を阻害することとなるため、本発明における第1の障壁層の機能を高めるために、バンドギャップエネルギーを大きくし、膜厚を薄くすることが好ましく、また上記A1を含む窒化物半導体からなる第1の障壁層の場合には、A1を含む窒化物半導体からなる第2の障壁層に比較して、A1混晶比を高く、膜厚を小さくして、結晶性悪化を抑えて、良好な井戸層の形成を実現できる。

【0029】更に好ましい構成としては、第1の障壁層の膜厚が30Å以上150Å以下の範囲とし、第2の障壁層の膜厚が50Å以上300Å以下の範囲とすることである。この構成により、第1の障壁層をキャリア閉込め可能な膜厚とでき、好ましくは50Å以上とすることで、閉込め効率を高めた構造とできる。これは、第1の障壁層の膜厚が小さいと、図5(b)に示すように、キャリアのトンネル現象が発生するためであり、30Å以上とすることでトンネルを防ぎ、さらに50Å以上とすることで、トンネルを効果的に防いで閉込め効率を高めることができる。第1の障壁層の膜厚を150Å以下とすることで、上述したA1を含む窒化物半導体による結晶性悪化を防いで良好な井戸層の形成を可能とし、更に、第1導電型層側からのキャリア注入を阻害しない障壁とできる。また、第2の障壁層の膜厚については、図5(a)及び図5(b)に示すように、第2導電型層28、29がp型層である場合に、p-n接合が第2の障壁層2b近傍に設けられるため、この第2導電型層と井戸層が近づきすぎると、井戸層がその影響を受けて、効率的なキャリア再結合の機能を損なう傾向にあるためである。さらに、第2導電型層内において、上述したキャリア閉込め層28は、活性層近傍に配置され、且つこのキャリア閉込め層は、大きなバンドギャップエネルギーを有するために、組成としては他の層に比べてA1を高混晶で有する層となり、そのことにより他の層に比べて抵抗が大きくなり、素子動作時における発熱量が大きく、第2の障壁層2bは、このような熱による井戸層への悪影響を防止するスペーサーとしての役目を果たすこととなる。このため、好ましくは50Å以上の膜厚とすることであり、更に好ましくは80Å以上とすることにより上記問題を好適に防いで素子特性を良好なものとする。また、膜厚の上限としては、300Å以下とすることでキャリア閉込め層の下地となる際に良好な結晶性が保持し、また第2の障壁層の膜厚が300Åより大きくと、第1導電型層側からのキャリアが井戸層から離れたキャリア閉込め層により閉じ込められてキャリアの閉込め効率が低下する傾向にあり、更に好ましい結晶性とす

るには、200 Å以下とすることであり、150 Å以下とすると結晶性に優れ、好適な位置にキャリア閉込め層が配置され好ましい。

【0030】また、上述した素子において、前記第1導電型層、第2導電型層内に、前記第1の半導体層、第2の半導体層を介し、活性層から離間して、クラッド層がそれぞれ設けられている素子構造では、第1導電型層内のクラッド層が第1の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きく、第2導電型層内のクラッド層が第2の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きくなると好ましい。これは、上述したように、各障壁層でのキャリア閉込めとは別に活性層の外に設けることで、段階的なバンド構造として、キャリアの注入を良好なものとできる。また、LDのような端面発光素子において、光閉込めのクラッド層を設ける場合には、第1、2の窒化物半導体層を光ガイド層などとでき、なおかつ、従来のように、活性層よりも大きなバンドギャップエネルギーとしないため、比較的格子整合性に優れ、結晶性を良好なものとして、素子構造を形成できる。具体的には、上記課題であるA1混晶による結晶性悪化を抑えた素子構造の形成が可能となる。この時、具体的な構成としては、第1の半導体層、第2の半導体層が、それぞれA1を含む窒化物半導体からなり、第1の半導体層、第2の半導体層のA1混晶比が、前記第1の障壁層よりも小さいものとし、上述した短波長系の発光素子においても、優れた結晶性の素子とできる。また、その他の素子構造としては、図6(a)に、発光素子200として示すように、基板201の上に、第1の半導体層202を含む第1導電型層11、第1の障壁層2a、井戸層1a、第2の障壁層2bを有する活性層203(12)、第2の半導体層205とキャリア閉込め層204を含む第2導電型層13とが積層された構造とできる。ここで図6

(a)は、導電性基板201上に上記素子構造が設けられ、電極207が基板の裏面に設けられて、基板を挟んで各導電型層の一对の電極が対向配置された構造であり、図6(b)は、基板の同一面側に各導電型層の一对の電極が配置された構造である。

【0031】更に好ましい構成としては、前記第1導電型層、第2導電型層にそれぞれ設けられた光ガイド層で挟持された活性層により導波路が形成された窒化物半導体発光素子において、第1導電型層内に設けられた光ガイド層が、前記第1の半導体層を有する構造とすることである。すなわち、従来と異なり活性層(第1の障壁層)より小さいバンドギャップエネルギーの第1、2の半導体層を、各光ガイド層に用いることができ、窒化ガリウム系材料において、格子定数差、熱膨張係数差を小さくした素子構造の形成が可能となる発光素子が得られる。この時、好ましくは、各ガイド層が、第1、2の半導体層と同様に、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーを小さくすることで、A1混晶比を低くした素

子構造とでき、結晶性を良好なものとした発光素子となる。すなわち、A1を含む窒化物半導体からなる第1の障壁層よりもA1混晶比の低い第1の半導体層、第2の半導体層を、各光ガイド層に用いることで、図2(b)に示すように、活性層を挟む下部光ガイド層26、上部光ガイド層29のA1混晶比を小さくした構造とでき、活性層及び素子全体のA1混晶比を低く抑えて、結晶性に優れる素子とでき、信頼性に優れる素子が得られる。

【0032】このような光ガイド層で挟持された活性層において、更に上記クラッド層を光閉込め層として設ける構造とした導波路を有する発光素子とすると、更に優れた特性の素子を得ることが可能となる。具体的な構成としては、活性層を挟持する光ガイド層を挟んで、前記第1導電型層、第2導電型層に光閉込めのクラッド層がそれぞれ設けられると共に、該第1導電型層内のクラッド層が、第1の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きく、該第1導電型層内のクラッド層が、第1の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きいものとするのである。これにより、光ガイド層と光閉込めのクラッド層とを有する分離閉込め型の発光素子において、窒化ガリウム系半導体材料においてバンドギャップエネルギーを大きくし、屈折率を小さくするアルミニウムの混晶比を、素子全体で小さくした発光素子とすることができる。これにより、結晶性、素子信頼性、さらにはその積層において安定した製造が可能となり、素子特性ばらつきを小さくして、歩留まりを向上させることが可能となる。すなわち、A1を含む窒化物半導体からなる下部クラッド層25のA1混晶比を下部光ガイド層26(第1の半導体層)よりも大きくし、またA1を含む窒化物半導体からなる上部クラッド層30のA1混晶比を上部光ガイド層29(第2の半導体層)よりも大きくすることで、各ガイド層よりも屈折率の小さい光閉込めのクラッド層とできる。この時、更に好ましくは、図2(b)に示すように、光閉込めの各クラッド層のA1混晶比を第1の障壁層2aよりも小さくすることで、A1混晶比を低く抑えて、光閉込めに必要となる厚膜でのクラッド層形成に有利となる素子構造とでき好ましい。

【0033】上記構成に加えて、第1の障壁層が、前記クラッド層よりもバンドギャップエネルギーが大きいものとするので、結晶性に優れる素子構造の形成が可能となる。

【0034】以上により、このような導波路を有する発光素子としては、レーザ素子、端面発光素子、スーパーluminescentダイオードなどに用いることができる。

【0035】

【発明の実施の形態】以下、本発明の半導体素子について、主に窒化物半導体の半導体素子を用いて、本発明の実施形態を説明するが、本願はこれに限定されず、従来知られた様々な材料の半導体、AlGaAs、AlGaPなど、に適用できるものである。

【0036】本発明の窒化物半導体の素子に用いる窒化物半導体としては、 GaN 、 AlN 、もしくは InN 、又はこれらの混晶である $III-V$ 族窒化物半導体（ $In_\alpha Al_\beta Ga_{1-\alpha-\beta}N$ 、 $0 \leq \alpha$ 、 $0 \leq \beta$ 、 $\alpha + \beta \leq 1$ ）であり、またこれに加えて、 III 族元素として B を用いたり、 V 族元素として N の一部を P 、 As で置換した、混晶でもよい。また、 Al を含む窒化物半導体は $\beta > 0$ であり、 In を含む窒化物半導体は $\alpha > 0$ である。本発明の実施形態において、特に、本発明において、短波長系であるワイドバンドギャップの窒化物半導体素子は、活性層中に、 GaN 若しくは Al を含む窒化物半導体からなる井戸層を有し、第1導電型層、第2導電型層に、それぞれ少なくとも1つの Al を含む窒化物半導体からなる層が設けられる素子である。

【0037】また、窒化物半導体層に用いる n 型不純物としては、 Si 、 Ge 、 Sn 、 S 、 O 、 Ti 、 Zr 等の IV 族、若しくは VI 族元素を用いることができ、好ましくは Si 、 Ge 、 Sn を、さらに最も好ましくは Si を用いる。また、 p 型不純物としては、特に限定されないが、 Be 、 Zn 、 Mn 、 Cr 、 Mg 、 Ca などが挙げられ、好ましくは Mg が用いられる。これら、アクセプター、ドナーを添加することにより、各導電型の窒化物半導体層を形成し、後述する各導電型層を構成する。また、本発明における第1導電型層、第2導電型層には、部分的にアンドープの層、半絶縁性の層が積層されていても良く、レーザ素子における逆導電型の埋込層（電流阻止層）のように、各導電型層内に部分的に寄生な素子部分を形成していても良い。

【0038】以下、本発明における各層について、窒化物半導体を用いて説明する。

【0039】本発明における活性層としては、好ましくは量子井戸構造を有するものであり、 GaN 若しくは Al を含む窒化物半導体からなる井戸層を有し、 Al を含む窒化物半導体若しくは In と Al を含む窒化物半導体からなる障壁層を有する。また、特に、活性層における波長が、 375 nm 以下の発光を有する短波長に好ましく用いられ、具体的には前記井戸層のバンドギャップエネルギーが波長 375 nm 以下であるものである。このとき、活性層に用いられる窒化物半導体は、 n ドーパ、 n 型不純物ドーパ、 p 型不純物ドーパのいずれでもよいが、好ましくは n ドーパ若しくは p ドーパ、又は n 型不純物ドーパの窒化物半導体を活性層内に設けることで、レーザ素子、発光素子などの窒化物半導体素子において、高出力化が図れる。好ましくは、井戸層を p ドーパとし、障壁層を n 型不純物ドーパとすることで、レーザ素子、発光素子が高出力で発光効率の高い素子となる。ここで、量子井戸構造としては、多重量子井戸構造、単一量子井戸構造のどちらでも良い。好ましくは、多重量子井戸構造とすることで、出力の向上、発振閾値の低下などが図ることが可能となる。活性層の量子

井戸構造としては、前記井戸層を少なくとも1層、障壁層をその井戸層を挟むように両側に少なくとも1層ずつ積層したものをを用いることができる。この時、量子井戸構造である場合に、井戸層数としては、1以上4以下とすることで、例えばレーザ素子、発光素子においては、閾値電流を低くすることが可能となり好ましく、更に好ましくは、井戸層数を2又は3とした多重量子井戸構造とすることで、高出力のレーザ素子、発光素子が得られる傾向にある。

【0040】本発明における井戸層としては、 GaN 若しくは Al を含む窒化物半導体を用いることが好ましく、該 GaN 、 Al を含む窒化物半導体からなる井戸層を活性層内に少なくとも1層有することであり、多重量子井戸構造においては、好ましくは、すべての井戸層が上記窒化物半導体からなる井戸層とすることで、短波長化され、高出力、高効率の発光素子、レーザ素子が得られる。発光スペクトルがほぼ単一ピークの場合は、この構成が好ましいが、一方で複数のピークを有する多色発光素子においては、前記 GaN 若しくは Al を含む窒化物半導体からなる井戸層を少なくとも1層有することで、短波長域の発光ピークを得ることができ、様々な発光色の発光素子、もしくは、その短波長域で励起される蛍光体と組み合わせた発光装置に得ることが可能である。この時、多色発光の素子とする場合に、井戸層の具体的な組成としては、 $In_\alpha Ga_{1-\alpha}N$ （ $0 < \alpha \leq 1$ ）を用いることで、紫外域から可視光域までの良好な発光・発振を可能とする井戸層となる。この時、 In 混晶比により、発光波長を決めることができる。また、波長が 375 nm 以上となる井戸層を用いた発光素子では、 In を含む窒化物半導体の井戸層を用いることができ、具体的な組成としては、上記 $In_\alpha Ga_{1-\alpha}N$ （ $0 < \alpha \leq 1$ ）が好ましい。

【0041】本発明の短波長系の Al を含む窒化物半導体からなる井戸層は、従来の $InGaN$ の井戸層では困難な波長域、具体的には、 GaN のバンドギャップエネルギーである波長 365 nm 付近、若しくはそれより短い波長を得るものであり、特に波長 375 nm 以下の発光・発振が可能なバンドギャップエネルギーを有する井戸層である。これは、従来の $InGaN$ 3元混晶の井戸層では、 GaN のバンドギャップエネルギーの波長 365 nm 付近では、例えば 370 nm では、 In 組成比が1%以下程度に調整する必要があるが、このように In 組成比が極端に小さくなると、発光効率が低下し、十分な出力の発光素子、レーザ素子が得られがたく、また In 組成比が1%以下では、その成長を制御することも困難である。本発明では、好ましくは GaN 若しくは Al を含む窒化物半導体からなる井戸層を用いていることで、従来効率的な発光が困難であった 375 nm の波長域において、 Al 組成比 x を大きくすることでバンドギャップエネルギーを大きくし、短波長のレーザ素子に用いるこ

とが可能である。

【0042】ここで、短波長発光の井戸層に用いられるAlを含む窒化物半導体の具体的な組成としては、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, $x + y < 1$) で表される組成であり、好ましい組成としては、3元混晶の $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$)、4元混晶の $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 < y \leq 1$, $x + y < 1$) を用いることであり、短波長となる2元混晶のGaNからなる井戸層を用いることもできる。

【0043】以下、Alを含む窒化物半導体の井戸層について詳しく述べると、AlとInを含む窒化物半導体においては、Inを有することにより、井戸層における発光効率を高める作用が働き、また、Inを有することにより、Alを含む窒化物半導体による強い応力を緩和させ、ピエゾ電界に変化を付けることができる。一方で、In混晶比yがほぼ0となるAlを含む窒化物半導体を井戸層に用いると、これは、窒化物半導体の成長に用いられているMOCVD等の気相成長法では、構成元素が多くなることによる構成元素間での反応抑え、特に、AlとInとの反応により結晶性悪化の問題を抑えることで、結晶性に優れた井戸層を形成することができる。ここで、AlとInを含む窒化物半導体、例えば $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 < y \leq 1$, $x + y < 1$)、Alを含みInを含まない窒化物半導体、例えば $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x \leq 1$)、におけるAl組成比xは、特に限定されず、Al組成比を変化させることにより、所望のバンドギャップエネルギー、波長を得ることである。また、これらに、上述したようにB、P、As等を用いて、5元混晶以上の多元化も可能であるが、好ましくはAlInGaNの4元混晶、AlGaNの3元混晶とすることで、この元素同士の反応を防いで、結晶性の良好な井戸層の形成が可能となる。

【0044】ここで、AlとInを含む窒化物半導体、例えば $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x \leq 1$, $0 < y \leq 1$, $x + y < 1$) におけるIn混晶比yとしては、好ましくは0.02以上0.1以下の範囲であり、より好ましくは0.03以上0.05以下の範囲であり、0.02以上とすることで、閾値電流低減、発光効率の向上が図れ、0.03以上とすることで更にそれら効果を発現でき、一方、0.1より大きくなると、上述したように、構成元素同士の反応による結晶性悪化が現れ始め、0.05以下とすることで、結晶性を良好なものとして、発光効率向上、閾値電流低減を可能とする。

【0045】また、365nm以上380nm以下の領域においては、Inを含む井戸層を用いることもできる。このとき、窒化物半導体からなる井戸層の具体的な組成としては、 $In_zGa_{1-z}N$ ($0 < z < 1$) とすれば、所望の発光波長が得られる。このとき、障壁層の

組成として、具体的には、 $Al_uIn_vGa_{1-u-v}N$ ($0 < u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$, $u + v \leq 1$) で表される窒化物半導体を用いることができるが、発光波長が380nmから短くなるにつれて障壁層のAl混晶比uが大きくなるように用いる。その際、従来の第1の障壁層とはほぼ同じAl混晶比よりも、Al混晶比の小さい層として第2の障壁層が活性層内に設けられることで、結晶性低下を防止し、一方で、第1の障壁層よりもAl混晶比の小さい第2の障壁層が設けられることで、両者に挟まれたInを含む井戸層において、下界面と上界面に異なる応力が加わり、Alを含む窒化物半導体による圧電界を小さくし、バンドギャップのひずみを低減できると考えられ、井戸層における発光効率を向上できる傾向にある。内部障壁層を設ける場合であっても、第1の障壁層よりもAl混晶比の小さい第2の障壁層とすることで、上記効果はあり、そのときの好ましい内部障壁層は、第1の障壁層よりもAl混晶比の小さい層とすればよく、さらに第2の障壁層よりもAl混晶比の大きい層とすれば、結晶性の低下を防止でき好ましく、また第2の障壁層のAl混晶比と同じとすれば、全ての障壁層において、井戸層との十分なオフセットが得られやすくなり好ましい。

【0046】また、井戸層の膜厚及び井戸層の数としては、膜厚及び井戸層の数を任意に、例えば膜厚1原子層以上、井戸層数1層以上、決めることが可能である。具体的な膜厚としては、1nm以上30nm以下の範囲であり、膜厚1nm未満で井戸層として良好に機能させることが困難な傾向にあり、30nmを超える膜厚では、Alを含む窒化物半導体の成長を結晶性良くすることが困難となり、素子特性が低下する。好ましくは2nm以上20nm以下の範囲とすることで、Vf、しきい値電流密度を低減させることができる。また、結晶成長の観点からは、2nm以上であると、膜厚に大きなむらがなく比較的均一な膜質の層が得られ、20nm以下とすることで結晶欠陥の発生を低く抑えて結晶成長が可能となる。更に好ましくは、井戸層の膜厚を、3.5nm以上とすることで、高出力のレーザ素子、発光素子が得られる傾向にあり、これは井戸層の膜厚を大きくすることで、大電流で駆動させるレーザ素子のように、多量のキャリア注入に対して、高い発光効率、内部量子効率でもって発光再結合が成されることによると考えられ、特に多重量子井戸構造において効果があると考えられる。単一量子井戸構造では、膜厚を5nm以上とすることで、上記と同様な効果が得られる。活性層内の井戸層数としては特に限定されず、1以上であり、この時、井戸層の数が4以上である場合には、活性層を構成する各層の膜厚が厚くなると、活性層全体の膜厚が厚くなって、Vfの上昇を招くこととなるため、井戸層の膜厚を10nm以下の範囲として、活性層の膜厚を低く抑えることが好ましい。多重量子井戸構造においては、複数の井戸層の

内、上記範囲の膜厚にある井戸層を少なくとも1つ設けることであり、好ましくは、全ての井戸層を上記範囲内とすることである。また、各井戸層の膜厚が異なっているとしても良く、ほぼ同一でも良い。

【0047】本発明の井戸層には、p型不純物若しくはn型不純物がドーピングされていても、アンドープでも良い。井戸層にドーピングする不純物としては、好ましくはn型不純物とすることで、発光効率の向上に寄与するものとなる。しかしながら、井戸層はInとAlを含む窒化物半導体を用いられ、不純物濃度が大きくなると結晶性が悪化する傾向にあるため、不純物濃度を低く抑えて結晶性の良好な井戸層とすることが好ましい。具体的には、結晶性を最大限に良好なものとするために井戸層をアンドープで成長させることであり、この時、不純物濃度は $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以下と実質的に不純物を含まない井戸層とすることである。また、井戸層に、例えばn型不純物をドーピングする場合には、n型不純物濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上の範囲でドーピングされていると、結晶性の悪化を低く抑え、なおかつキャリア濃度を高くすることができ、しきい値電流密度、Vfを低下させることができる。この時、井戸層のn型不純物濃度としては、障壁層のn型不純物濃度とほぼ同じか、若しくは小さくすることで、井戸層での発光再結合を促し、発光出力が向上する傾向にあるため好ましい。この時、井戸層、障壁層をアンドープで成長させて、活性層の一部を構成しても良い。また、井戸層が活性層内に複数設けられる多重量子井戸構造においては、各井戸層の不純物濃度をほぼ同様なものとしても良く、異なるものとしても良い。

【0048】特に、大電流で素子を駆動させた場合（高出力のLED、ハイパワーLED、スーパーフォトルミネセンスダイオードなど）では、井戸層がアンドープで、実質的にn型不純物を含有しないことで、井戸層でのキャリアの再結合が促進され、高い効率での発光再結合が実現され、逆にn型不純物が井戸層にドーピングすると、井戸層でのキャリア濃度が高いため、かえって発光再結合の確率が減少し、一定出力下で駆動電流、駆動電流の上昇を招く悪循環が発生し、素子の信頼性（素子寿命）が低下する傾向にある。このため、このような高出力の素子では、井戸層のn型不純物濃度を、少なくとも $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下にすることであり、好ましくはアンドープ若しくは実質的にn型不純物を含有しない濃度とすることで、高出力で安定した駆動が可能な窒化物半導体素子が得られる。また、井戸層にn型不純物をドーピングしたレーザ素子では、レーザ光のピーク波長のスペクトル幅が広がる傾向にあるため、好ましくないため、この場合不純物濃度を $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。

【0049】本発明において、障壁層の組成としては、短波長系において、Alを含む窒化物半導体からなる障

壁層を用いることである。ここで、本発明の活性層において、活性層内の少なくとも1つの障壁層が、Alを含む窒化物半導体からなることを必要とするものであり、活性層内の全ての障壁層が、Alを含む窒化物半導体からなるものであっても良く、Alを含まない窒化物半導体からなる障壁層を活性層内に設けても良い。障壁層は、井戸層よりもバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体とする必要があり、井戸層の発光波長が375nm以下の領域では、それに対応する障壁層には、Alを含む窒化物半導体を用いることが好ましい。Alを含む窒化物半導体の障壁層として、好ましくは $\text{Al}_u\text{In}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ ($0 < u \leq 1$, $0 \leq v \leq 1$, $u + v < 1$) で表される窒化物半導体を用いることである。具体的には、Alを含む窒化物半導体の障壁層は、上記組成式で表されるIn混晶比vが0より大きい、 AlInGaN の4元混晶、 AlGaN の3元混晶を用いることができる。また、障壁層のAl組成比uは、Alを含む窒化物半導体の井戸層のAl組成比xよりも大きく、 $u > x$ として、井戸層と障壁層との間に十分なバンドギャップエネルギー差を設けることで、レーザ素子、発光素子として良好な発光効率を有する量子井戸構造が形成される。また、障壁層がInを含有する場合 ($v > 0$)、In組成比vについては、好ましくは0.1以下とすることで、上述したように結晶性の悪化を抑え、更に好ましくは0.05以下の範囲を適用することができる。これは、In組成比vが0.1を超える場合には、成長時にAlとInとの反応が促進し、結晶性が悪化して良好な膜が形成されない傾向にあるためであり、さらに $v \leq 0.05$ とすることで、さらに良好な結晶性で障壁層を形成できる。また、上述したように、障壁層のIn組成比は発光再結合がなされる井戸層に比べて、広い組成比を適用でき、主にAl組成比によりバンドギャップエネルギー差を設けることから、 $v \geq y$ とすることも可能であり、このようなIn組成比とすることで、井戸層、障壁層の臨界膜厚を変化させることができ、量子井戸構造において比較的自由に膜厚を設定でき、所望の特性の活性層を設計できる。

【0050】以上説明したように、本発明の障壁層は、短波長系においては、上記井戸層と同様にAlとInを含む窒化物半導体、具体的には $\text{Al}_u\text{In}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ ($0 < u \leq 1$, $0 < v \leq 1$, $u + v < 1$) の4元混晶、In混晶比vがほぼ0のAlを含む窒化物半導体、具体的には $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u}\text{N}$ ($0 < u \leq 1$) を用いることができる。また、より長波長の領域では、上述したように、Ga N 若しくは、Inを含む窒化物半導体を用いることができ、具体的には、 $\text{In}_v\text{Ga}_{1-v}\text{N}$ ($0 \leq v \leq 1$) を用いることで、紫外域から赤色域までの可視光域に広く適用できる。

【0051】また、量子井戸構造の活性層において、障壁層は、井戸層と交互に形成しても良く、1つの井戸層

に対して複数の障壁層を設けても良い。具体的には、上述したように、井戸層に挟まれた障壁層を2層以上とし、少なくとも上記第1の障壁層、第2の障壁層を有する構造とすることであり、多層膜の障壁層と井戸層を交互に積層した構造を設けることもできる。

【0052】また、障壁層には、上述した井戸層と同様に、p型不純物、n型不純物がドーピングされているが、好ましくはn型不純物がドーピングされているかノンドープ若しくはアンドープとされていることである。この時、障壁層中に例えばn型不純物をドーピングする場合にはその濃度として、少なくとも $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングされていることである。具体的には、例えばLEDである場合には、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上 $2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下の範囲でn型不純物を有することであり、また、より高出力のLED及び高出力のLDでは、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以上 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下の範囲、好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上 $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以下の範囲でドーピングされていることが好ましく、このように高濃度で障壁層にドーピングする場合には、井戸層がn型不純物を実質的に含まないか、アンドープで成長させることが好ましい。また、障壁層にn型不純物をドーピングする場合には、活性層内の全ての障壁層にドーピングしても良く、一部をドーピング、一部をアンドープとした構成でも良い。一部の障壁層にn型不純物をドーピングする場合には、活性層内で、n型層側配置された障壁層にドーピングすることが好ましく、具体的には、n型層側から数えてn番目の障壁層 B_n ($n=1, 2, 3 \dots$) にドーピングすることで、電子が効率的に活性層内に注入され、発光効率、内部量子効率に優れた素子となる。これは、障壁層に限らず、井戸層についても同様であり、また両方にドーピングする場合には、n型層から数えてn番目の障壁層 B_n ($n=1, 2, 3 \dots$)、m番目の井戸層 W_m ($m=1, 2, 3 \dots$) にドーピングすること、すなわち、n型層に近い側からドーピングすることで、上記効果が得られる傾向にある。

【0053】また、後述の実施例に示すように、Mgドーピングのp側電子閉込め層を設ける場合、特に活性層及び／又は障壁層に接して設ける場合には、Mgが拡散するため、活性層内で最もp型層側に配置されたp側障壁層にn型不純物をドーピングすると、コドーピングとなり活性層の機能が悪化される傾向にある。このため、Mgドーピングのp側電子閉込め層を設ける場合、好ましくは、このp側障壁層はn型不純物を実質的に含まないことでこれを回避でき、具体的には $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 未満となるようにする。

【0054】障壁層の膜厚としては、特に限定されないが、50nm以下として量子井戸構造を構成することであり、好ましくは井戸層と同様に1nm以上30nm以下の範囲とすることであり、これは30nm以下とするこ

とで結晶性の悪化を抑えて、1nm以上とすることで、障壁層として良好に機能しうる膜厚となるからである。更に好ましくは2nm以上20nm以下とすることであり、これにより、2nm以上であることで比較的均一な膜が形成され、より良好に障壁層の機能が備わり、20nm以下とすることで結晶性が良好なものとなる。

【0055】本発明の量子井戸構造の活性層において、短波長系の発光素子における好ましい実施形態としては、上記2元、3元混晶の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 \leq x < 1$)、4元混晶の $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x \leq 1, 0 < y \leq 1, x+y < 1$) からなる井戸層と、4元混晶の $\text{Al}_u\text{In}_v\text{Ga}_{1-u-v}\text{N}$ ($0 < u < 1, 0 < v < 1, u+v < 1$) 若しくは3元混晶の $\text{Al}_u\text{Ga}_{1-u}\text{N}$ ($0 < u < 1$) からなる障壁層と、を1対以上有するものである。具体的には、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)の活性層12として示すように、 AlGaInN 若しくは AlInGaInN の井戸層1を1層以上、 InAlGaInN 若しくは AlGaInN の障壁層2を2層以上有することであり、これにより内部量子効率、発光効率に優れた井戸層となり、さらにAlを含む窒化物半導体により、そのAl組成比を調整することで、図3(a)及び図3(b)に示すように、375nm以下の短波長域での発光が可能な井戸層とできる。また、その井戸層1よりも大きなバンドギャップエネルギーの障壁層2を、 InAlGaInN 若しくは AlGaInN とすることで、上記短波長域においても、優れた障壁層を提供できる。

【0056】(活性層とそれを挟む第1導電型層、第2導電型層) 本発明の実施形態において、活性層12を挟む第1導電型層11、第2導電型層13の積層構造で、特に、活性層の近くに配置される層、具体的には活性層に接して隣接して配置される層と、活性層との関係について、以下詳しく述べる。

【0057】従来提案・採用されているレーザ素子構造は、図4(a)及び図4(b)にそのバンド構造を、図7に、図2(a)の積層構造におけるAl混晶比の変化を示すように、活性層を挟む光ガイド層26、29、更にその両外側を挟むクラッド層25、30の順にバンドギャップエネルギーが大きくなる構造が採られてきた。例えば、波長410nmの $\text{AlGaInN} / \text{InGaInN}$ 系窒化物半導体レーザ素子では、図7において、光ガイド層26、29のAl組成比を0の基点とし、それよりもバンドギャップエネルギーの小さい活性層においては、In混晶比に置き換えることで、従来のレーザ素子のバンドギャップ構造となる。また、従来の紫外域の短波長における AlGaInN 系半導体レーザ素子では、図7に示すように、活性層の外側の光ガイド層26、39、更にその外側のクラッド層の順に、Al混晶比を大きくし、それにより図4(a)及び図4(b)に示すように活性層から外側に向かってバンドギャップエネルギーを大きく

した構造が提案されてきた。また、従来の紫外域発光の AlGaIn 窒化物半導体発光素子においては、上記レーザ素子において、クラッド層、若しくは光ガイド層を除いた構造が提案されており、具体的には、図 7 に示す光ガイド層 26、29、クラッド層 25、30 を、キャリア閉込め層に用いた構造、すなわち、発光層（活性層 27）よりも Al 組成比を大きくし、バンドギャップエネルギーの大きな層を形成してきた。しかしながら、このように、Al 混晶比を活性層の外側に向かって、順に大きくしていく構造では、結晶性の悪化、特にクラックの発生が深刻な問題を生むものとなっていた。

【0058】本発明では、図 2 (a) 及び図 2 (b) に示すように、活性層 27 を挟む両光ガイド層 26、29 が、活性層内の障壁層 2 よりもバンドギャップエネルギーを小さくし、Al 混晶比を小さくした構造とすることで、上述した従来の構造におけるクラックの発生を好適に抑制し、室温において連続発振可能な構造とできる。具体的には、第 1 導電型層内に、第 1 の半導体層 26 が設けられ、該第 1 の半導体層 26 を活性層内の障壁層 2、特に第 1 の障壁層 2a よりもバンドギャップエネルギーが小さくなるように、すなわち、短波長域の活性層においては、障壁層の Al 混晶比より小さい第 1 の半導体層の Al 混晶比を小さくすることである。この時、井戸層と第 1 の半導体層との関係は、活性層の井戸層において、発光再結合させるために、井戸層よりも第 1 の半導体層のバンドギャップエネルギーを大きくする。また、この関係は、第 2 導電型層にも適用でき、具体的には、第 2 導電型層内の第 2 の半導体層 29 を、活性層中の障壁層よりもバンドギャップエネルギーを小さく、また Al 混晶比を小さくすることである。これら障壁層よりも Al 混晶比の小さい第 1 の半導体層（第 2 の半導体層）を用いて、活性層の近く、好ましくは隣接して配置することで、良好なキャリア閉込め、及び結晶性の良好な活性層が実現でき、並びに、これらの層を光ガイド層に用いることで、短波長域において好適な導波路構造が形成される。以下このことについて、詳しく説明する。

【0059】本発明の一実施形態における窒化物半導体素子は、図 2 (a) 及び図 3 (a) に示すように、第 1 導電型層 11、第 2 導電型層 13 との間に活性層 12 が設けられた構造で、具体的な積層構造としては、図 2

(a) に示すように、第 1 導電型層 11 として、コンタクト層 23、下部クラッド層 25、下部光ガイド層 26 が順に積層され、その上に活性層 27、活性層の上に、第 2 導電型層 13 として、キャリア閉込め層 28、上部光ガイド層 29、上部クラッド層 30、コンタクト層 24 が順に積層された構造を有している。ここで、キャリア閉込め層、光ガイド層、クラッド層、コンタクト層、の互いに隣り合う層は、図 2 (a) に示すように接する場合に限定されず、各層間に別の層を設けて離間されていても良い。ここで、図 2 (a) は本発明における導波

路構造を有する素子の積層構造を示す断面図であり、図 3 (a) は活性層及びそれを挟んで配置された活性層の近くの層の積層構造 40 を示し、図 3 (b) はその積層構造 40 に対応したバイアス状態のバンド構造 41、特に第 1 導電型層 11 を n 型層側、第 2 導電型層 13 を p 型層側とした場合を示すものである。図 4 (a)、図 4 (b)、図 5 (a) 及び図 5 (b) のバンド構造 41 についても図 3 (b) と同様であり、各図中の白丸（白抜きの円）はホールを、黒丸（黒で塗りつぶした円）は電子のキャリアを示し、矢印は、各キャリアの動きを模式的に示すものであり、反対向きに曲げられた矢印はバンドオフセットにより各キャリアが閉じ込められる様子を示し、実線は導電帯 E_c 、価電子帯 E_v を示し、点線はフェルミ準位 E_F を示している。図 3 (a) からわかるように、井戸層 1 を挟む障壁層 2a、2b よりも、バンドギャップエネルギーの小さい第 1 の半導体層 26、第 2 の半導体層 29、が活性層を挟んで配置され、上部・下部光ガイド層として用いられている。ここでは、第 2 導電型層（p 型層側）内に、活性層の近く、好ましくは隣接して、キャリア閉込め層 28 が設けられ、第 2 の半導体層 29 と活性層 27 との間に設けられている。すなわち、活性層内の障壁層 2a によりホールが井戸層内に閉じ込められ、電子は障壁層 2b 及び／又は活性層 27 に隣接するキャリア閉込め層 28 により閉じ込められた構造となっている。従来のバンド構造である図 4 (a) 及び図 4 (b) では、キャリア閉込めのためのオフセットが第 1 導電型層中の層 26 と活性層 27、障壁層 2a との間に設けられ、活性層 27、障壁層 2a よりもバンドギャップエネルギーの大きな窒化物半導体層若しくは光ガイド層 26 が活性層に隣接して設けられて、キャリア閉込めとして機能するが、活性層 27、障壁層 2a に隣接する第 1 の半導体層 26 では、活性層にキャリア閉込める構造となっておらず、最も第 1 導電型層側に配置された第 1 の障壁層 2a でもって、井戸層 1a 内に閉じ込められる。

【0060】以下、井戸層、障壁層、及び第 1 の半導体層（第 2 の半導体層）の関係について説明する。本発明の窒化物半導体素子は、上述したように第 1 導電型層、活性層、第 2 導電型層とが積層せられた構造であるが、ここでは、第 1 導電型層を n 型の窒化物半導体を有する n 型層、第 2 導電型層を p 型の窒化物半導体を有する p 型層として説明する。上述したように、量子井戸構造の活性層において、n 型層側に最も近くに配置された n 側障壁層を第 1 の障壁層、一方で、p 型層側に最も近くに配置された p 側障壁層を第 2 の障壁層として説明する。ここで、本発明では、好ましくは n 側障壁層の近くで、第 1 導電型層（n 型層）内に設けられた第 1 の半導体層との関係において、第 1 の障壁層より第 1 の半導体層がバンドギャップエネルギーが大きくなるのが好ましい。本発明の活性層には、少なくとも、第 1 の障壁層

と、それよりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の障壁層と、それら障壁層の間に少なくとも1つの井戸層を有する。この時、第1の障壁層は、井戸層よりも第1導電型層（n型層）側に、第2の障壁層は井戸層よりも第2導電型層（p型層）側に設けられる必要がある。このため、活性層内では、少なくとも1つの井戸層よりもp型層側に設けられた第2の障壁層（p側障壁層）を設けて、少なくとも第1の障壁層と、第2の障壁層とで井戸層を挟み込む構造が設けられていることが好ましい。なぜなら、井戸層を挟んで設けられた第1の障壁層と、第2の障壁層は、それぞれ最もn型層の近く、最もp型層の近くに設けられた障壁層であるため、異なる機能を有するためである。

【0061】第1の障壁層は、活性層中で最もn型層の近くに配置された障壁層であり、更に好ましくは、活性層内で最も外側で、最もn型層側に設けられることであり、更に好ましくは、n型層、第1の半導体層に接して、設けられることである。これは、井戸層を介して、n型層に離間して第1の障壁層が設けられると、例えば図4（b）に示す形態では、第1の障壁層2aよりもn型層側にある井戸層では、キャリアの注入があり、n型層側へオーバーフローするキャリアが発生し、一方で第1の障壁層を厚膜としてn型層側へのオーバーフローを抑え、それよりもn型層側にある井戸層において、キャリアが注入されず、発光再結合などの井戸層としての機能を損なうものとなるためである。逆に、第1の障壁層は、第1の障壁層と、p型層とで挟まれる活性層内の井戸層へキャリアを閉じ込めるための障壁として機能し、また、第2の障壁層も同様に第2の障壁層とn型層間の井戸層にキャリアを閉込めとして機能する一方で、井戸層に挟まれた障壁層、例えば図5（a）及び図5

（b）の障壁層2c、2dは、各井戸層にキャリアを分散して閉じ込める機能を有し、第1の障壁層、第2の障壁層と井戸層の間の障壁層とでは異なる機能を有するものとなる。そのため、第1の障壁層の機能を最大限活用するには、活性層内の最も外側に第1の障壁層、第2の障壁層を配置することで、活性層内へキャリアを好適に閉じ込めることが可能となる。

【0062】また、第2の障壁層については、上述したようにこの第2の障壁層に加えて、後述するキャリア閉込め層を活性層の外部、好ましくは活性層に接して、第2導電型層（p型層）中に設けることで、キャリアを活性層中の非対称な障壁層の構造に対応して設けられ、各井戸層に閉じ込めること構造とできる。このように、第2の障壁層に加えて、キャリア閉込め層を活性層外部に配置することで、窒化物半導体において、ホールに比べて、電子は拡散しやすい性質にあり、キャリア拡散長も大きい傾向にあるが、これを改善して、活性層内、特に井戸層内に好適にキャリアを閉込め、注入できる構造となる。ここで、第2の障壁層は、第1の障壁層と同様

に、井戸層よりもp型層（第2導電型層）側に配置され、更に好ましくは最もp型層の近くに配置された障壁層とし、最も好ましくは、活性層において最も外側で、p型層側に配置させることで、好適なキャリア注入が可能となる。また、キャリア閉込め層との関係から、キャリア閉込め層と離間して、配置されせることもできるが、好ましくは、p型層中のキャリア閉込め層28に接して第2の障壁層を形成することで、第1の半導体層よりもバンドギャップエネルギーの大きいキャリア閉込め層に対して、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の障壁層によるキャリアの井戸層への注入を促進でき好ましい。

【0063】また、上述した第1の障壁層、第2の障壁層のように、活性層内で井戸層よりも、第1導電型層、第2導電型層の近くに配置され、活性層中の障壁層の中でも最も外側の障壁層以外の障壁層は、例えば、図5

（a）及び図5（b）に示すように、井戸層1aと井戸層1b、井戸層1bと井戸層1cとに挟まれた内部障壁層2c、2dを設けることもできる。特に多重量子井戸構造においては、このような井戸層に挟まれた内部障壁層を用いることで、複数存在する井戸層において、キャリアが好適に各井戸層に分配され、注入・閉込められる。すなわち、上記第1の障壁層2a、第2の障壁層2bと異なる機能を有するものであり、第1の障壁層、第2の障壁層よりも膜厚を薄くしても、井戸層に挟まれた障壁層の機能を損なわない量子井戸構造とでき、活性層全体の膜厚を抑えて、V_fの上昇を抑えることができ好ましい。また、図5（a）に示すように、第1の障壁層2a、第2の障壁層2bよりも、バンドギャップエネルギーの大きな内部障壁層2cとすると、各導電型層から注入されたキャリアに対し、井戸層間に介在する障壁の大きなこれら内部障壁層2c、2dにより、活性層に隣接する各導電型層からキャリア注入する際に、大きな内部障壁層を越えることとなり、特に、第2導電型層側から低い障壁の第2の障壁層を越えて井戸層にキャリア注入される際に、内部障壁層を越えて、第1導電型層側にある井戸層へのキャリア注入効率が低下する傾向にある。また図5（b）に示すように、第1の障壁層2a、第2の障壁層2bよりも、井戸層に挟まれた障壁層2c、2dとすると、これら内部に位置する障壁層での閉込め機能を弱めて、外部に位置する第1の障壁層2a、第2の障壁層2bをこれら障壁層に比較して強めることで、井戸層数が多くなっても、外部の障壁層が大きな障壁を形成することから、各井戸層へのキャリアの注入・閉込めを好適に実現しうる構造とできる。すなわち、上述したように、内部障壁層のバンドギャップエネルギーを、図5（b）に示すように、第1の半導体層よりも小さくすることで、第2導電型層側からのキャリア注入において、最も遠くの第1の障壁層が最も大きなバンドギャップエネルギーとでき、各井戸層への注入を良好なも

のとできる。また、この時好ましくは、内部障壁層のバンドギャップエネルギーを第2の障壁層よりも大きくすることで、図5(b)に示すように、第1導電型層側から第2導電型層側に近づくに従って、段階的にバンドギャップエネルギーが大きくなる障壁層の構成とでき、各井戸層への好ましいキャリア注入が可能となる。

【0064】以上説明したように、外部の障壁層である第1の障壁層2a、第2の障壁層2cは、内部の井戸層に挟まれた障壁層と異なる機能を有することから、内部の障壁層と外部の障壁層との間で、膜厚、バンドギャップエネルギー、組成を異なるものとした構成として、所望の素子特性の素子を得ることが可能となる。また、図5(b)に示すように、内部障壁層を複数有する活性層では、各内部障壁層間で、異なる組成、バンドギャップエネルギー、膜厚とすることも可能であり、ほぼ同一の組成、バンドギャップエネルギー、膜厚とすることもでき、好ましくは、ほぼ同一の組成、バンドギャップエネルギー、膜厚とすることで、内部障壁層でほぼ均等な機能を付与することができ、各井戸層へのキャリアの注入が好適になされる。

【0065】また、上述したように、各障壁層への不純物ドーピングとしては、最もn型層側に位置する第1の障壁層2bには、n型不純物をドーピングすることが上述した理由により好ましく、最もp型層側に配置される第2の障壁層には、n型不純物をドーピングするよりも、実質的n型不純物がドーピングされていない状態、具体的には、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以下の不純物濃度とすることが好ましい。これは、窒化物半導体に用いられるp型不純物は、拡散性の高い不純物が多く、例えば良く用いられるMg、Znなどは、積層構造内を広く拡散する傾向にあり、障壁層にp型不純物がドーピングされるとそれに隣接する井戸層への拡散が起こり、井戸層でのキャリアの発光再結合を阻害する傾向にあるためである。また、p型層側に近い第2の障壁層をアンドープとすることで、p型層からの不純物の拡散をその障壁層内に留める作用が付与され、井戸層へのさらなる不純物の拡散を防止でき好ましい。特に、キャリア閉込め層28をp型層中に有し、第2の障壁層に近接して、好ましくは第2の障壁層に接して配置される場合には、キャリア閉込め層は比較的高抵抗な層となる傾向にあるため、高濃度でp型不純物がドーピングされる傾向にあり、この不純物の拡散が問題となるが、第2の障壁層をアンドープとすることでこの拡散による井戸層の機能低下を防ぐことができ好ましい。また、キャリア閉込め層近傍において、p-n接合が形成され、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)等に示すように、キャリア閉込め層では、素子構造内において、最も大きなA1混晶比で形成される傾向にあることから、高A1混晶比の窒化物半導体による大きな圧電がかかり、井戸層に悪影響を及ぼす傾向にあるが、キャリア閉込め層よりもA1混晶比の小さい第

2の障壁層をアンドープで形成することで、井戸層への悪影響を抑制できる傾向にあり、好ましい。

【0066】また、第1の障壁層、第2の障壁層との比較において、第1の障壁層を第2の障壁層よりも大きな膜厚とする場合には、第2導電型層中にキャリア閉込め層28を設けることで、第2の障壁層による活性層内へのキャリア閉込め機能を低下させ、すなわち、上記内部障壁層に近い働きをする障壁層とし、キャリア閉込め層28でもって、主に活性層へのキャリア閉込めを実現する構造とでき、活性層全体の膜厚が小さくできるため、Vf低下に寄与でき、また窒化物半導体においては、ホールの拡散長が、電子の拡散長よりも十分に小さいため、ホールの注入口となる第1の障壁層の膜厚が小さいことで、井戸層へのキャリア注入が効率よくなされ好ましい。一方で、p型不純物がドーピングされたキャリア閉込め層28を有する場合、若しくは、活性層の近く、好ましくは活性層に接して配置された第2の半導体層29が、第1の障壁層よりも大きなバンドギャップエネルギーを有する場合には、A1混晶比の高い層が活性層に隣接して設けられることとなる。このため、A1混晶比の高い層は高抵抗であることから、この層では素子動作中に大きな発熱を生み、それが井戸層に接近していると、井戸層への熱による悪影響が発生し、素子特性を低下させる傾向にある。また、このようなA1混晶比の大きな層と活性層との界面、若しくはA1混晶比の大きい層の活性層側界面、若しくはその近傍において、図3

(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、p-n接合が形成され、その近くに活性層の井戸層が設けられていると、井戸層での発光再結合において、バイアスが悪影響を及ぼす傾向にある。すなわち、第1の障壁層は、井戸層とA1高混晶層との間をあげて、上記A1高混晶層による悪影響が井戸層に及ばないように離間させるスペーサーとして機能させると好ましい。この場合、第1の障壁層の具体的な膜厚としては、少なくとも20Å以上とすることで上記スペーサーの機能を発現でき、好ましくは、40Å以上の膜厚で井戸層への影響を抑えた活性層とでき好ましい。

【0067】以下、本発明の一実施形態について説明する。

【0068】本発明における素子構造としては、量子井戸構造の活性層を、第1導電型層と第2導電型層とで、挟む構造を有するもので、活性層、第1導電型層、第2導電型層の各層には、窒化物半導体からなる層が用いられている。具体的には、図2(a)に示すように、基板21の上に、第1導電型層11、活性層12、第2導電型層13が積層された構造を有する素子であり、活性層は、少なくとも障壁層と井戸層を有する量子井戸構造で構成される。ここで、第1導電型層と第2導電型層との間に設けられた量子井戸構造の活性層12には、図3

(a)の積層構造40に示すように、少なくとも前記第

1導電型層11側に配置された第1の障壁層2aと、前記第2導電型層13側に配置された第2の障壁層2bと、これら第1の障壁層2aと第2の障壁層2bとに挟まれた少なくとも1つの井戸層1を少なくとも有するものである。特に、これら第1の障壁層2aと第2の障壁層2bとは、それぞれ最も第1導電型層側、第2導電型層側に配置された障壁層であることが好ましく、更に、これら障壁層は、活性層内で最も外側に配置された層であることが好ましい。これは、図5(a)及び図5

(b)に示すように、内部に配置された内部障壁層2c、2dと、上記第1の障壁層2a、第2の障壁層2bとは、異なる働きを有することにある。

【0069】本発明では、これら障壁層を有する活性層において、第1の障壁層2aのバンドギャップエネルギーより、第2の障壁層2bのバンドギャップエネルギーが小さいことを特徴としている。具体的には、図3

(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)などに示すように、第1の障壁層2aより第2の障壁層2bがバンドギャップエネルギーが小さいことで、第2導電型層13側からのキャリア注入において、図中の矢印で示すように、従来の経路52よりも本発明の経路51の方が障壁が小さく、効率的な井戸層1aへのキャリア注入を実現できる。更に、第2導電型層13側のキャリアは、図中の矢印で示すように、バンドギャップエネルギーの大きく、第1導電型層11側の第1の障壁層2aにより、井戸層1a内に閉じ込められる。この時、特に好ましくは、第1導電型層11がn型層であり、第2導電型層13がp型層であると、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、伝導体側に比して価電子帯側に大きな障壁が形成されることで、窒化物半導体のように、ホールの拡散長が電子に比べて小さい系において、障壁層のような薄膜で、小さい障壁によっても、好適なホールの注入、閉込めが実現される。加えて、n型層側11、p型層側13の素子構造において、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5

(b)に示すように、窒化物半導体素子では、pn接合部が活性層とp型層13との界面近傍に形成される傾向にあり、第2の障壁層2bのバンドギャップエネルギーが大きいと、ホールの注入に対する障壁が大きくなる傾向にあるためである。

【0070】一方で、n型層側11、p型層側13との間に活性層が設けられた素子構造において、電子の閉込めを考慮するとき、図3(a)、図3(b)、図5

(a)及び図5(b)に示すように、p型層13内の活性層近傍に、電子閉込めのキャリア閉込め層28を配置することで、上述したpn接合部が、キャリア閉込め層28近傍に形成され、電子を閉じ込めるの好適な障壁が形成されるため、上記障壁層に加えて用いることが好ましい。この時更に好ましくは、図3(a)、図3

(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、活性

層に接して、キャリア閉込め層28が第2導電型層13内に設けられることで、井戸層近くに大きな障壁が形成されて閉込め効果を高めることができ好ましく、更に好ましくは、図3(a)に示すように、活性層27内で第2導電型層13側で最も外側の層として配置された第2の障壁層2bに接して、キャリア閉込め層28が形成されることで、障壁の小さい第2の障壁層2bで閉込めが困難な第1導電型層11側からのキャリアを好適に閉じ込める構造が実現できる。

【0071】本発明の一実施形態としては、上記第1の実施形態に組み合わせ適用されるものであり、具体的には、図3(a)、図3(b)、図5(a)及び図5

(b)に示すように、第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層26を、第1導電型層側11に設けることであり、更に、第2導電型層側13にも同様に、第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の半導体層29を配置することである。この時、第2導電型層13において、第2の半導体層29を設ける場合に、上述したキャリア閉込め層28を介して、活性層から離間して第2の半導体層29を設けること、すなわち、第2の半導体層29と活性層12との間に、キャリア閉込め層28を設けることが好ましい。

【0072】このように、活性層12、特にその活性層12内で最も大きなバンドギャップエネルギーとなる第1の障壁層2aよりもバンドギャップエネルギーの小さい窒化物半導体層を、活性層12を挟む第1導電型層側11、第2導電型層側13に設けることで、短波長域の発光素子において、素子特性を向上させることが可能となる。これは、上述したように、従来の短波長域の窒化物半導体発光素子において、図4(a)及び図4(b)に示すように、活性層よりもバンドギャップエネルギーの大きい層、すなわち、A1混晶比の高い層を設ける必要があり、熱膨張係数差などの影響で結晶性が悪化するものとなる。本発明では、従来の素子とは異なり、活性層を挟む第1導電型層側11、第2導電型層側13に、活性層よりもバンドギャップエネルギーの小さい層を設けることで、結晶性悪化を抑えて、良好な結晶性の活性層、素子形成を可能とする。また、実施例に示すように、第1導電型層11、活性層12、第2導電型層13の順に積層された素子においては、活性層12の下に配置される第1導電型層11のA1混晶比を小さい抑えることで、良好な結晶性でもって活性層の形成が可能となり、活性層を挟む第1導電型層11、第2導電型層13にそれぞれ、活性層、特に第1の障壁層2aよりもA1混晶比の小さい層を設けることで、A1を含む窒化物半導体により活性層に係る強い応力を緩和させて、素子駆動に優れた活性層の形成が可能となる。

【0073】以下、本発明の素子に用いられる各層について、特に短波長系における実施形態を元に詳細に説明

する。

【0074】（レーザ素子、導波路構造）本発明の一実施形態は、窒化物半導体素子構造として、活性層を、第1導電型層、第2導電型層とで、挟み込む構造を有するレーザ素子、端面発光素子とする。具体的には、図2

(a)に示すように、基板上に、第1導電型層11、活性層12、第2導電型層13とが積層された構造を有し、さらには、第1導電型層11内に第1の光ガイド層26、第2導電型層13内に第2の光ガイド層29、が少なくとも設けられ、これら第1、第2の光ガイド層26、29とで、活性層を挟み込む構造を有し、第1、2の光ガイド層とその間の活性層とで導波路を形成する。更に、後述するように、第1導電型層が下部クラッド層25、第2導電型層が上部クラッド層30をそれぞれ有する場合には、この上部、下部クラッド層25、30とで挟み込まれ、活性層を含む領域が、導波路となる。上部クラッド層25、下部クラッド層30とで、挟まれた導波路内に光ガイド層を設けると、閾値電流密度を低減させ、高出力のレーザ素子が得られる。以下に、導波路に光ガイド層を有する素子構造について、特に、井戸層のバンドギャップエネルギーがGaNとほぼ同じか、それよりも大きいワイドバンドギャップの短波長系について説明する。

【0075】本発明の第1の実施形態において、図2

(a)に示すように、導波路として、活性層12と、第1導電型層11内の第1の光ガイド層29、第2導電型層内の第2の光ガイド層26とが、設けられた構造を有し、特に上述した波長380nm以下の活性層を用いた導波路が設けられた構造を特徴とする素子である。

【0076】この導波路は、主に活性層からの光を導波させるものであり、この導波路構造によりレーザ素子、端面発光素子において、発光効率、閾値電流密度、その他の素子特性が様々に変化する。光ガイド層は、このように、活性層を挟んで形成されるが、第1導電型層、第2導電型層の少なくとも一方のみに光ガイド層を形成すること、すなわち、第1の光ガイド層若しくは第2の光ガイド層だけでもよいが、好ましくは活性層の両側に、光ガイド層を設けることで、閾値電流密度が低下し、高出力のレーザ素子が得られる。

【0077】本発明の第1の光ガイド層26、第2の光ガイド層29としては、Alを含む窒化物半導体を用いられ、また、図3(b)、図5(a)及び図5(b)のバンド構造41として示すように、少なくとも量子井戸構造の活性層27内の井戸層1よりも大きなバンドギャップエネルギーとし、また活性層27と光ガイド層26、29との屈折率差を小さくして、導波路構造とする。また、光ガイド層は、図3(b)、図5(a)及び図5(b)に示すように、光ガイド層26、29の全部が、障壁層よりもバンドギャップエネルギーが小さくても良く、図4(a)及び図4(b)に示すように、障壁

層よりも大きな層が光ガイド層の一部として設けられていても良い。この場合、第1の障壁層を除く光ガイド層、若しくはその一部が障壁層よりもバンドギャップエネルギーを大きくするか、若しくは図5(b)に示すように、内部障壁層、第2の障壁層、すなわち活性層中の障壁層の一部より光ガイド層のバンドギャップエネルギーを大きくすることができる。すなわち、好ましくは、光ガイド層が、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第1の半導体層を有すること、さらに好ましくは第1の半導体層からなる光ガイド層、若しくは第1の半導体層以外の層を有する多層膜の光ガイド層において、光ガイド層全体を第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーより小さくすることで、上記第1の障壁層のキャリア閉込め層としての機能を好適に発現できる。更に、Al混晶比の小さい光ガイド層を形成することで、例えば、それにより下部光ガイド層が形成されると、Alを含む窒化物半導体による結晶性悪化を抑えて、活性層を形成でき、発光素子、レーザ素子特性に優れた素子を得ることができる。この時、更に好ましくは、光ガイド層の一部、好ましくは全部のバンドギャップエネルギーを、内部障壁層よりも小さくすること、更に好ましくは、第1の障壁層よりも小さくすることで、さらに優れた素子とできる。すなわち、上記短波長系にあっては、Alを含む窒化物半導体から成る光ガイド層の一部、好ましくは全部のAl混晶比を内部障壁層より小さくし、更に好ましくは第2の障壁層よりも小さくすることである。また、第1の半導体層を、第1導電型層中の光ガイド層を設けるのと同様に、第2導電型層に光ガイド層を設ける場合において、上述したように、第2の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい第2の半導体層を設けることもでき、この時の作用についても第1の半導体層と同様である。更に、第2の半導体層が上部光ガイド層に設けられる場合において、光ガイド層の組成として具体的には、 $\text{In}_\alpha\text{Al}_\beta\text{Ga}_{1-\alpha-\beta}\text{N}$ ($0 \leq \alpha, 0 < \beta, \alpha + \beta \leq 1$) が用いられる。好ましくは、Inを含まない窒化物半導体とすること、すなわち、In組成比が0の窒化物半導体とすることで、Inを含むことによる光の吸収を防ぎ、光の損失を低く抑えた導波路とできる。さらに、好ましくは $\text{Al}_\beta\text{Ga}_{1-\beta}\text{N}$ ($0 \leq \beta \leq 1$) を用いることで、紫外域から赤色域までの幅広い波長域に適用できる導波路となる。特に上記波長380nm以下の短波長域の光を導波させるには、好ましくは $\text{Al}_\beta\text{Ga}_{1-\beta}\text{N}$ ($0 < \beta \leq 1$) が用いられる。これは、GaNでは、上記短波長域の光を吸収し、それが損失となって、閾値電流密度、電流-光出力特性を悪化させるからである。特に、光ガイド層のAl組成比 β は、光ガイド層のバンドギャップエネルギー E_g 、活性層の発光の光子エネルギー E_p に比べて、 0.05 eV 以上大きくなるように ($E_g - E_p \geq 0.05\text{ eV}$)、調整することが好ましい。これに

より、上記短波長域において、ガイド層による光の損失が抑えられた導波路となるからであり、更に好ましくは $E_g - E_p \geq 0.1$ とすることで、更に優れた導波路が形成される。すなわち、この条件を満たし、なおかつ、上述した第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーを小さくした光ガイド層とすることで素子特性に優れた導波路が形成される。

【0078】また第1の光ガイド層26、第2の光ガイド層29は、どちらか一方若しくは両方が、単一膜で形成されていても良く、多層膜で形成されていても良い。単一膜の窒化物半導体からなる光ガイド層を形成する場合には、図3(a)に示すように、活性層27を挟む第1の光ガイド層26、第2の光ガイド層29の積層構造40が設けられ、そのバンド構造41は、活性層よりもバンドギャップエネルギーが大きくなるようにする。具体的には、上記 $Al_\beta Ga_{1-\beta}N$ ($0 \leq \beta \leq 1$) を用いることであり、上記短波長域においては $Al_\beta Ga_{1-\beta}N$ ($0 < \beta \leq 1$) を用い、さらに好ましくは上述したように第1の光ガイド層及び第2の光ガイド層のバンドギャップエネルギー E_g が、光子エネルギー E_p に比べて、 0.05 eV 以上大きいこと ($E_g - E_p \geq 0.05\text{ eV}$ 、好ましくは $E_g - E_p \geq 0.1$) となるように、 Al 組成比 β を調節する。

【0079】第1の光ガイド層26、第2の光ガイド層29の膜厚としては、特に限定されず、具体的には、 10 nm 以上 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下の範囲であり、好ましくは 20 nm 以上 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下の範囲であり、更に好ましくは 50 nm 以上 300 nm 以下の範囲とする。これにより、 10 nm 以上でガイド層として機能し、 20 nm 以上とすることで閾値電流密度を低下させる導波路が形成される傾向にあり、 50 nm 以上とすることで更に閾値電流密度を低下させる傾向にあるためである。また、 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下ではガイド層として機能し、 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下で光が導波する際の損失を減少させ、 300 nm 以下とすることで光の損失を更に抑えられる傾向にあるためである。

【0080】本発明の光ガイド層を多層膜の窒化物半導体で構成しても良く、その場合も上記と同様に、 1 n を含まない窒化物半導体を用いることが好ましく、さらに上記 $Al_\beta Ga_{1-\beta}N$ ($0 \leq \beta \leq 1$) を用いることが好ましく、上記短波長域においては $Al_\beta Ga_{1-\beta}N$ ($0 < \beta \leq 1$) を用いることが好ましく、この窒化物半導体層を各々の光ガイド層に1層以上用いた多層膜とする。具体的には、第1の光ガイド層26に、第1の層、第1の層と異なる組成の第2の層、第2の光ガイド層29に、第3の層と、第3の層と異なる組成の第4の層、を用いる。ここで、第1～4の層は、窒化物半導体からなる。これにより、各ガイド層内の第1の層と第2の層との間、第3の層と第4の層との間、において、 Al 組成比を異なるようにして、バンドギャップエネルギー、

屈折率の異なる多層膜構造としても良い。

【0081】例えば、第1導電型層、活性層、第2導電型層が積層された構造で、第1の光ガイド層が、第1の層と第2の層とを有し、第2の光ガイド層が第3の層と、第4の層とを有し、第2の層と第3の層とを活性層側に配置して、第1の層と第4の層とを活性層から遠い位置に配置した構造として、バンドギャップエネルギーを活性層に近づくに従って段階的に小さくした構造とする。具体的には、活性層側の第2の層、第3の層の Al 組成比 β_2 、 β_3 を、活性層から遠い第1の層、第4の層の Al 組成比 β_1 、 β_4 よりも小さくすること、 $\beta_1 > \beta_2$ 、 $\beta_4 > \beta_3$ とすることで、段階的なバンド構造となり、導波路内の活性層にキャリアが効率的に注入され、また活性層及び活性層付近が屈折率が大きくなることから、導波路内で活性層付近に光が多く分布した構造とできる。このように、光ガイド層を多層膜とするのには、 Al 組成比を大きくすると結晶性の悪化する傾向にあり、単一膜で光ガイド層を形成することが結晶性の悪化により困難な場合、若しくは特性悪化が発生する場合に、多層膜で形成して結晶性の悪化を小さく抑えることができるからである。また、上記、 $\beta_1 > \beta_2$ 、 $\beta_4 > \beta_3$ とは逆に、 $\beta_1 < \beta_2$ 、 $\beta_4 < \beta_3$ として、活性層に近いガイド層（第2の層、第3の層）のバンドギャップエネルギーを大きくし、屈折率を小さくし、遠いガイド層（第1の層、第4の層）を小さくし、屈折率を大きくすることも可能であるが、好ましくは上記キャリア注入、光の分布が良好となることから、 $\beta_1 > \beta_2$ 、 $\beta_4 > \beta_3$ とすることである。また、多層膜の光ガイド層とする場合に、上記第1～4の層に限らず、各光ガイド層を3層以上で構成しても良く、第1の層（第3の層）と第2の層（第4の層）と交互に複数積層した、すなわち第1の層と第2の層とを1対として複数の対を積層してガイド層を構成しても良い。また、多層膜の光ガイド層とする場合には、上記条件式、 $E_g - E_p \geq 0.05\text{ eV}$ 、を計算する場合には、光ガイド層全体の平均組成により算出する。例えば、 $Al_{\beta_1}Ga_{1-\beta_1}N$ ($0 < \beta_1 \leq 1$) からなる膜厚 d_1 の第1の層、 $Al_{\beta_2}Ga_{1-\beta_2}N$ ($0 < \beta_2 \leq 1$ 、 $\beta_1 \neq \beta_2$) からなる膜厚 d_2 の第2の層、で第1の光ガイド層を構成する場合には、 Al の平均組成 β_m は、各構成層の膜厚で加重平均した次式、 $\beta_m = (d_1 \times \beta_1 + d_2 \times \beta_2) / (d_1 + d_2)$ 、で得られる。

【0082】また、本発明の光ガイド層において、活性層に近づくに従ってバンドギャップエネルギーが小さくなるように、組成傾斜させたGRIN構造としてもよい。具体的には、 Al 組成比 β を傾斜させること、すなわち活性層に近づくに従って Al 組成比 β が小さくなるように組成傾斜させることで、GRIN構造とできキャリアの注入効率が向上する。この時、組成傾斜は、図8(a)に示すように連続的に組成を傾斜させても良く、

不連続で段階的に組成を傾斜させても良い。また、超格子多層膜構造のように、例えば、上記第1の光ガイド層の第1の層／第2の層を交互に積層した複数対を有する構造においても、A1を組成傾斜させて、活性層に近づくに従ってバンドギャップエネルギーが小さくなるようにしても良く、この場合、少なくともいずれか一方の層だけ、例えば第1の層だけを組成傾斜させても良く、対を構成する全ての層、例えば第1の層及び第2の層を組成傾斜させても良い。また、光ガイド層の膜厚方向において、部分的に組成傾斜が設けられていても良く、好ましくは膜厚方向における全ての領域で組成傾斜させる方がキャリアの注入効率が向上する傾向にある。

【0083】更に、多層膜の光ガイド層において、多層膜の超格子構造としても良く、超格子構造を用いることで、上記A1を含む窒化物半導体による結晶性の悪化を抑制して、良好な結晶性の導波路を形成することができる。具体的には、第1の光ガイド層26において、前記第1の層と、第2の層とを交互に積層して、少なくとも一方を2層以上、好ましくは各層を2層以上とすること、若しくは第1の層と第2の層とを1対として複数対積層した構造とする。この時、各層の窒化物半導体の組成は上記と同様であるが、好ましくは、第1の層／第2の層が、 $Al_{\beta 1}Ga_{1-\beta 1}N$ ($0 \leq \beta 1 \leq 1$) / $Al_{\beta 2}Ga_{1-\beta 2}N$ ($0 \leq \beta 2 \leq 1$, $\beta 1 \neq \beta 2$)、上記短波長域においては $Al_{\beta 1}Ga_{1-\beta 1}N$ ($0 < \beta 1 \leq 1$) / $Al_{\beta 2}Ga_{1-\beta 2}N$ ($0 < \beta 2 \leq 1$, $\beta 1 \neq \beta 2$)を用いることで、光の損失を抑えて、なおかつ超格子構造により結晶性の悪化も抑えた導波路が形成される。光ガイド層を超格子構造とするには、多層膜を構成する各層の膜厚が超格子となるように設定することであり、組成及び各層の組み合わせによりその膜厚は異なるが、具体的には、10nm以下とすることであり、好ましくは7.5nm以下とすることによって結晶性を良好に保つことができ、更に好ましくは5nm以下とすることによって、より良好な結晶性とすることができる。

【0084】また、本発明の光ガイド層において、各導電型の不純物は、少なくとも層の一部にドーピングされることがキャリアの移動・注入が良好となるため好ましく、この時導電型の不純物は、光ガイド層の一部若しくは部分的にドーピングする形態、全体にドーピングする形態、のいずれかでも良い。また、多層膜の光ガイド層においては、例えば前記第1の層、第2の層を有する第1の光ガイド層において、両方にドーピングしても良く、又は第1の層と第2の層とで異なるドーピング量とするか、一方にドーピングして、他方をアンドーピングとした変調ドーピングとしても良い。例えば上記第1の光ガイド層において第1の層と第2の層とを交互に積層した、若しくは、複数対設けた構造のような超格子多層膜構造において好ましくは、一方の層、例えば第1の層にのみドーピングした変調ドーピングとすることで、不純物ドーピングによる結晶性の悪化を抑えること

ができる。更に好ましくは、A1組成比の低い層にのみドーピングすることで、結晶性の良好な層にドーピングすることができ、不純物ドーピングによる結晶性の悪化を抑えて、不純物ドーピングによる活性化も良好なものとなり好ましい。これは、例えば、前記第1の層／第2の層が、 $Al_{\beta 1}Ga_{1-\beta 1}N$ ($0 \leq \beta 1 \leq 1$) / $Al_{\beta 2}Ga_{1-\beta 2}N$ ($0 < \beta 2 \leq 1$, $\beta 1 < \beta 2$)の超格子多層膜構造である第1の光ガイド層において、A1組成比の小さい第2の層に不純物ドーピングして、第1の層をアンドーピングとすることで、A1組成比の小さい第2の層は第1の層より結晶性が良く、このためこの結晶性の良い層に不純物ドーピングすることで、良好な活性化が実現され、キャリアの移動・注入に優れた光ガイド層となる。

【0085】更に、本発明の光ガイド層の不純物ドーピングについて、図8(b)～図8(d)に、ドーピング量変化42として示すように、第1、2の光ガイド層26、29において、不純物ドーピング量を、活性層に近づくに従ってドーピング量を小さくする、若しくは、活性層から遠い領域に比べて活性層に近い領域のドーピング量を小さくすると、導波路、特に光ガイド層内において、光の損失を更に減少させて、良好な光の導波を実現でき、閾値電流密度の低減、駆動電流の低減化を図ることができる。これは、不純物ドーピングした領域を光が導波すると、不純物により光の吸収が発生しするために光の損失が起こるからである。これに加えて、導波路は上述したように、第1の光ガイド層26と第2の光ガイド層29とで活性層27を挟む構造を少なくとも有しており、さらにそのガイド層の外側若しくは導波路を、ガイド層より屈折率の小さい上部・下部クラッド層25、30とで挟む構造でもって光が導波路内に閉じこめられた構造となり、導波路内の活性層27及び活性層近傍に多くの光が分布するため、その活性層近傍の領域において不純物ドーピング量を少なくすることで、すなわち活性層側に低濃度不純物領域を設け、その外側(活性層から離れた領域)に高濃度不純物領域を設けることで、光が多く分布する領域での光の損失が減少することとなり、光の損失の少ない導波路となる。具体的には、第1の光ガイド層26、第2の光ガイド層29において、各層の膜厚の半分で領域を区切り活性層に近い領域と遠い領域を考えた場合、活性層に近い領域の導電型不純物濃度を、活性層に遠い領域の不純物濃度よりも小さくすることであり、活性層に近い領域が低濃度不純物領域、活性層に遠い領域が高濃度不純物領域となる。光ガイド層の不純物濃度としては、特に限定されないが、具体的には活性層に近い領域において $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。ここで、上記不純物ドーピングとは、第1の光ガイド層に第1導電型の不純物ドーピング、第2の光ガイド層に第2導電型の不純物ドーピング、することを指すものである。

【0086】光ガイド層内でドーピング量を変化させる形態としては、具体例として、各光ガイド層内において、活

性層に近づくに従ってなだらかに、連続的にドーブ量を小さくする形態(42a)、不連続で段階的にドーブ量を小さくする形態(42b)、またその段階的なドーブ量変化を細かくし、光ガイド層内で部分的にドーブ量変化を設ける形態(42c)、のいずれかでも良く、またこれらを組み合わせて用いても良い。好ましくは、光ガイド層内において、活性層側からの距離が、50nm以下の領域をアンドープ(低濃度不純物領域)とすることで光の損失低減が可能となり、好ましくは100nm以下の領域をアンドープ(低濃度不純物領域)とすることで良好な光損失の低減、閾値電流密度、駆動電流の低減が可能となる。この時、光ガイド層の膜厚は、アンドープ領域(低濃度不純物領域)を50nm以下の領域とする場合には、50nm以上の膜厚とし、100nm以下の領域とする場合には、100nm以上の膜厚とすることはいうまでもない。この時、上記アンドープ領域を光ガイド層内に設ける場合、好ましくは、上述した組成傾斜構造の光ガイド層と組み合わせて用いることであり、これは図8(a)に示すように、バンドギャップエネルギーが、活性層に近づくに従って小さくなるバンド構造であることにより、不純物ドーブされない領域が活性層近傍に設けられても、キャリアの注入効率の低下を抑えた光ガイド層が形成されるためである。この時、組成傾斜の光ガイド層は、上述したようにGRIN構造が好ましく、また上記多層膜構造で、バンドギャップエネルギーが活性層に近づくに従って小さくなる構造であっても、アンドープ領域の形成に効果がある。ここで、各光ガイド層内において、成長時に不純物ドーブしなくても、すなわちアンドープで光ガイド層を成長させても、隣接層から不純物が拡散する場合があります、その場合にはアンドープで成長させた上記領域においても、不純物がドーブされたものとなる。具体的には、p型不純物として好ましく用いられるMgは、このような拡散現象が起こりやすく、実施例1で示すように、アンドープでp側光ガイド層を形成しても、隣接層の電子閉込め層とクラッド層からの拡散により、p型不純物がドーブされる。このように、拡散により不純物ドーブが成される場合には、上述したように活性層に近い領域の不純物濃度を、遠い領域よりも小さくすることである。このようなドーブ領域は、少なくとも一方の光ガイド層に設けることが好ましく、更に好ましくは両方の光ガイド層に設けることで光の損失を低減させた導波路となる。なお、図8(b)~図8(d)中の61、62は、各光ガイド層におけるドーブ量変化を示している。

【0087】また、上記光ガイド層における層構成、不純物ドーブの形態、組成、膜厚などは、第1の光ガイド層、第2の光ガイド層とで同様なものとしても良く、異なるようにしても良い。例えば、第1の光ガイド層を単一膜とし、第2の光ガイド層を多層膜として、両光ガイド層の層構成を異なるようにした形態などがある。

【0088】(クラッド層) 本発明の一実施形態において、第1導電型層、活性層、第2導電型層とが積層された構造で、第1導電型層が下部クラッド層を有し、第2導電型層が上部クラッド層を有する窒化物半導体素子としても良い。具体的には、図2(a)に示すように、基板上に、第1導電型層11、活性層12、第2導電型層13とが積層された構造を有し、さらには、第1導電型層11内に下部クラッド層25、第2導電型層13内に上部クラッド層30、が少なくとも設けられ、これら上部、下部クラッド層25、30とで、活性層を挟み込む構造を有している。上部クラッド層25、下部クラッド層30とで、光閉込めされ、それらに挟まれた導波路内に、上述した光ガイド層を設けても良い。以下に、クラッド層を有する素子構造について、説明する。

【0089】上部、下部クラッド層25、30の組成は、図3(b)、図5(a)及び図5(b)のバンド構造41に示すように、活性層(井戸層)よりもバンドギャップエネルギーが大きくなるようにするものであり、また上記レーザ素子、端面発光素子において第1、2の光ガイド層26、29を有する場合には、光ガイド層と同等若しくはそれより大きくして、屈折率を光ガイド層より小さくする。これは、上部・下部クラッド層をキャリア閉込め、光閉込めとして機能させるものであり、光ガイド層を有する場合には光閉込め層として機能させる。クラッド層に用いられる窒化物半導体としては、 $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 \leq a, 0 < b, a+b \leq 1$) で表される窒化物半導体を用いられる。好ましくは、In組成比aが0の窒化物半導体を用いることで、Inを含む窒化物半導体ではクラッド層内で光の吸収による損失が発生しやすい傾向にあるからである。このため、好ましくは $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 < b \leq 1$) で表される窒化物半導体を用いることで、良好な光閉込め、更にガイド層を設けない場合には、良好なキャリア閉込めが可能となる。レーザ素子、端面発光素子において、導波路を上部、下部クラッド層で挟む構造において、導波路とクラッド層との間、具体的には活性層及び/又は光ガイド層との間、に十分な屈折率差を設けて、導波路内に光が閉じこめられて、光が導波する構成とする。このような屈折率差を設けるには、 $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 < b \leq 1$) が好ましく用いられ、光ガイド層のAl組成(平均組成)比 β との間で、少なくとも $\beta \leq b$ の関係を満たすようにし、好ましくは $b - \beta \geq 0.05$ となるようにすることで十分な屈折率差が設けられる。また、クラッド層による光の閉込めは、クラッド層の膜厚にも依存するため、膜厚も考慮して窒化物半導体の組成を決定する。本発明の実施例では、図2(b)に示すように、各クラッド層のAl混晶比(平均組成)を第1の障壁層よりも小さくしていることで、光閉込めに必要な屈折率差を光ガイド層との間で設け、なおかつ、厚膜でクラッド層を

形成することができる。すなわち、上述したA1混晶比が、活性層、特に第1の障壁層よりも低い光ガイド層に対して、所望の屈折率差が設けられたクラッド層を形成することで、クラッド層のA1混晶比を小さくすることが可能となる。更に、実施例では、第2の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい光ガイド層が形成されているため、クラッド層のA1混晶比を最大限低く抑えた構造とされ、素子特性に優れた短波長系の窒化物半導体素子が得られる。

【0090】本発明のクラッド層は、上記光ガイド層と同様に、単一膜で形成しても良く、多層膜で形成しても良く、また多層膜超格子構造としても良い。単一膜でクラッド層を形成する場合には、上記窒化物半導体からなる単一膜を形成することで、多層膜で形成する場合に比べて、光、キャリア閉込め構造の設計が容易であり、またクラッド層の成長にかかる時間を短縮できる。一方で、AlGaInなどのAlを含む窒化物半導体は、結晶性良く成長させることが困難で、特に単一膜のように、ある一定以上の膜厚で成長させるとクラックが発生しやすくなる。

【0091】クラッド層を多層膜で形成する場合には、組成の異なる窒化物半導体を複数積層するものであり、具体的にはAl組成比の異なる窒化物半導体を複数積層する。このように多層膜で形成すると、単一膜の場合における結晶性の悪化、クラックの発生を、抑制することが可能となる。具体的には、多層膜として、第1の層と、それと異なる組成の第2の層とを積層し、屈折率、バンドギャップエネルギーの異なる層を複数設ける。例えば、Al組成比 b_1 の第1の層と、Al組成比 b_2 ($b_1 \neq b_2$)の第2の層とを積層した構造の多層膜でも良く、この時Al組成比を $b_1 < b_2$ ($0 \leq b_1, b_2 \leq 1$)とした構成とすると、Al組成比の大きな第1の層で屈折率、バンドギャップエネルギーを大きくし、Al組成比の小さい第2の層で、第1の層を形成することによる結晶性の悪化を抑えることができる。また、第1の層、第2の層を積層し、第2の層と組成の異なる第3の層を積層するなどして、更に複数の組成の異なる層を積層しても良い。また、第1の層、第2の層を交互に複数積層した構造であっても良く、少なくとも第1の層、第2の層を有する対を、複数対形成した構造としても良い。このような、多層膜構造では、Alを含む窒化物半導体の結晶性悪化を抑えて、膜厚を大きくすることができるため、光閉込めにおいて重要となる膜厚を得ることが可能となる。

【0092】多層膜構造のクラッド層において、超格子構造とすることで、更に結晶性を良好なものとして、クラッド層を形成することができ好ましい。ここで、超格子構造は、クラッド層の少なくとも一部に設けることであり、好ましくは全てにおいて超格子構造を設けることで、結晶性良くクラッド層を形成できる。この時、著格

子構造としては、光ガイド層の場合と同様に、少なくとも第1の層と、第2の層とを交互に複数積層したり、少なくとも第1の層と第2の層とを有する対を、複数対設けた構造とする。超格子構造を構成する各層の膜厚としては、組成及び各層の組み合わせによりその膜厚は異なるが、具体的には、10nm以下とすることであり、好ましくは7.5nm以下とすることによって結晶性を良好に保つことができ、更に好ましくは5nm以下とすることによって、より良好な結晶性とすることができる。

【0093】クラッド層には、少なくとも各導電型の不純物をドーピングすることが好ましく、光ガイド層と同様に、全体にドーピングしても、部分的にドーピングしても良い。また、多層膜の場合にも光ガイド層と同様に、例えば前記第1の層、第2の層を有する多層膜で、両方にドーピングしても良く、又は第1の層と第2の層とで異なるドーピング量とするか、一方にドーピングして、他方をアンドーピングとした変調ドーピングとしても良い。例えば、前記第1の層/第2の層が、 $Al_{b_1}Ga_{1-b_1}N$ ($0 \leq b_1 \leq 1$) / $Al_{b_2}Ga_{1-b_2}N$ ($0 < b_2 \leq b_1, b_1 < b_2$)の超格子多層膜構造である場合に、Al組成比の小さい第2の層に不純物ドーピングして、第1の層をアンドーピングとすることで、光ガイド層と同様に結晶性を良くすることができる。

【0094】クラッド層の膜厚としては特に限定されないが、10nm以上2 μ m以下、50nm以上1 μ m以下の範囲で形成する。これは、10nm以上とすることでキャリアの閉込めが可能で、2 μ m以下とすることで、結晶性の悪化を抑え、更に50nm以上とすることで光閉込めが可能となりレーザ素子、端面発光素子などに用いることができ、1 μ m以下とすることで、結晶性良くクラッド層を形成することができる。

【0095】ここで、上部クラッド層、下部クラッド層としては、上記短波長系においてAlを含む窒化物半導体が好ましく用いられ、このことにより、導波路と両クラッド層との間で、屈折率差を大きくとることができる。このとき、クラッド層の窒化物半導体には、Inを含まないことが好ましく、なぜなら、Inを含む窒化物半導体は、Inを含まない場合に比べて、結晶性が悪化する傾向にあり、特に、活性層の上にp側クラッド層を有する構造では、そのp側クラッド層にInを含む窒化物半導体を用いると、結晶性の悪化が大きく、素子特性を大きく悪化させるものとなる。このとき、クラッド層に用いる窒化物半導体として具体的には、 $Al_bGa_{1-b}N$ ($0 < b < 1$)が好ましく用いられる。

【0096】(キャリア閉込め層<p側電子閉込め層>)本発明において、図3(b)、図5(a)及び図5(b)のバンド構造41に示すように、活性層27内部、若しくは活性層近傍にキャリア閉込め層28を設けることが、上記活性層内における第1、2の障壁層非対称構造との組合せにおいて好ましい。図2(a)、図3

(a), 図5(a)及び図5(b)に示すように、レーザ素子、端面発光素子のように、光ガイド層26, 29、クラッド層25, 30を有する構造の場合には、光ガイド層26, 29と活性層27との間、又は、活性層若しくは光ガイド層の一部として設けると良い。ここで、このキャリア閉込め層は、キャリアを活性層若しくは井戸層内に閉じ込めるもので、レーザ素子、高出力の発光素子などにおいて、素子駆動などによる温度上昇、電流密度増大によって、キャリアが活性層をオーバーフローすることを防ぐことが可能となり、活性層内にキャリアが効率的に注入される構造とできる。具体的には、図3(a), 図5(a)及び図5(b)に示すように、第2導電型層側に配置されたキャリア閉込め層28bにより、第1導電型層からのキャリアを閉込め、第1導電型層側のキャリア閉込め層28aにより、第2導電型層からのキャリアを閉込める。このキャリアを閉込め層は、少なくとも一方に設けることが好ましく、実施例1に示すように、第1導電型層をn型、第2導電型層をp型とした素子において、少なくともp型層側にキャリアを閉込め層を設けることが好ましい。これは、窒化物半導体において、電子の拡散長がホール拡散長に比べて長いこと、電子の方が活性層をオーバーフローしやすく、このため電子を閉じ込めるキャリア閉込め層28をp型層側に設けることで、高出力のレーザ素子、発光素子が得られる。特にバンドギャップエネルギーが小さい第二の障壁層と組み合わせて用いた素子について、以下p型層側にキャリアを閉込め層を、p側電子閉込め層として設ける例を説明するが、それは導電型層を代えることでn型層側にも適用できるものである。特に、p側電子閉込め層を少なくとも設けることが好ましく、これは、電子がホールに比べて、キャリア拡散長が長く、活性層をオーバーフローしやすいためである。

【0097】このp側電子閉込め層としては、Alを含む窒化物半導体を用いるものであり、具体的には $Al_{1-c}Ga_cN$ ($0 < c < 1$)を用いる。この時、Al組成比cとしては、キャリア閉込め層として機能するように、活性層より十分に大きなバンドギャップエネルギーを有する(オフセットをとる)必要があり、少なくとも $0.1 \leq c < 1$ の範囲とすることであり、好ましくは $0.2 \leq c < 0.5$ の範囲とすることである。なぜなら、cが0.1以下であるとレーザ素子において、十分な電子閉込め層として機能せず、0.2以上であると十分に電子閉込め(キャリアの閉込め)がなされ、キャリアのオーバーフローを抑え、加えて0.5以下であるとクラックの発生を低く抑えて成長させることができ、更に好ましくはcを0.35以下とすることで良好な結晶性で成長できる。また、上記光ガイド層を有する場合には、それよりも大きなバンドギャップエネルギーのキャリアを閉込め層とすることが好ましく、上記クラッド層を有する場合には、クラッド層とほぼ同じかそれよりも

大きなバンドギャップエネルギーのキャリアを閉込め層とすることである。これはキャリアの閉込めには光の閉込めとなるクラッド層より高い混晶比の窒化物半導体が必要となるからである。このp側電子閉込め層は、本発明の窒化物半導体素子に用いることができ、特にレーザ素子のように、大電流で駆動させ、多量のキャリアを活性層内に注入する場合において、p側電子閉込め層を有していない場合に比べて、効果的なキャリアの閉込めを可能とし、レーザ素子だけでなく、高出力のLEDにも用いることができる。また、この時、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの大きいキャリア閉込め層とすることで、上記活性層非対称構造において、優れた素子特性を得ることができる。

【0098】本発明のキャリア閉込め層の膜厚としては、少なくとも100nm以下とすることであり、好ましくは40nm以下とすることである。これは、Alを含む窒化物半導体は、他の窒化物半導体(Alを含まない)に比べて、バルク抵抗が大きく、更にp側電子閉込め層のAl混晶比は上述したように高く設定されるため、100nmを超えて素子内に設けると、極めて高抵抗な層となり、順方向電圧Vfの大幅な増加を招くこととなるためであり、40nm以下であるとVfの上昇を低く抑えることが可能で、更に好ましくは20nm以下とすることで更に低く抑えることが可能となる。ここで、p側電子閉込め層の膜厚の下限としては、少なくとも1nm以上、好ましくは5nm以上とすることであり、電子閉込めとして良好に機能する。ここで、キャリアを閉込め層は、単一膜で形成して良く、組成異なる多層膜で形成しても良い。

【0099】また、本発明の窒化物半導体素子において、光ガイド層を設けずに、クラッド層だけを設ける場合には、活性層とクラッド層との間に上述したようにキャリアを閉込め層に十分なバンドオフセットが存在すれば、キャリアを閉込め層を、クラッド層とは別に設ける必要は内が、光ガイド層を有する構造のように、クラッド層が活性層から離間して配置される場合には、活性層とクラッド層との間に、好ましくは活性層近傍にキャリアを閉込め層を設けること良い。これは、活性層から離れた位置にキャリアを閉込め層を設けると上記キャリアのオーバーフローを抑制する効果がなくなるからである。具体的には、活性層とp側電子閉込め層(キャリア閉込め層)との距離は、100nm以下とすることでキャリアの閉込めとして機能し、更に好ましくは500Å以下とすることで良好なキャリアの閉込めが可能となる。活性層外部にキャリアを閉込め層を配置する場合には、最も好ましくは活性層に接して配置することで、最も効率よくキャリアが活性層内に閉じ込められる。このように、活性層内にキャリアを閉込め層を設ける場合には、活性層内部の障壁層、特に第1の障壁層に比べてバンドギャップエネルギーを大きくするものであり、好ま

しくは、活性層内の全ての障壁層よりもバンドギャップエネルギーを大きくすることで、上記活性層非対称構造に適合した活性層外部のキャリア閉込め層とできる。

【0100】本発明のp側電子閉込め層（キャリア閉込め層）には、アンドープであっても、p型不純物（各導電型の不純物）がドーピングされても良い。好ましくは、各導電型に設定する不純物がドーピングされることであり、例えばp側電子閉込め層ではp型不純物がドーピングされることで、これはドーピングすることでキャリアの移動度が高まりV_fを低下できるためである。さらにレーザ素子、ハイパワーLEDなどの大電流で駆動させる場合には、キャリアの移動度を高めるため、高濃度でドーピングすることが好ましい。具体的なドーピング量としては、少なくとも $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることで、好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることであり、前記大電流駆動の素子にあっては、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上、好ましくは $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることである。p型不純物量の上限は特に限定されないが、 $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。但し、p型不純物量が多くなると、バルク抵抗が大きくなる傾向にあり、結果としてV_fが上昇することになるため、これを回避する場合に好ましくは、必要なキャリア移動度を確保する最低限のp型不純物濃度とすることである。また、アンドープでキャリア閉込め層を形成して、隣接層からの不純物拡散によりドーピングすることも可能である。

【0101】本発明では、活性層外部、特にp型層側に配置され、p型不純物がドーピングされたp側キャリア閉込め層を用いることで、印加時に、図3（b）及び図5（b）に示すように、活性層近傍に配置されたキャリア閉込め層付近で、p-n接合部が形成され、p型層側からのキャリア注入を阻害するオフセットが設けられず、なおかつ、オフセットの小さい第2の障壁層により、井戸層への効率的なキャリア注入を実現する。

【0102】

【実施例】

【0103】【実施例1】以下、実施例として、図1に示すようなレーザ素子構造の窒化物半導体を用いたレーザ素子について、説明する。

【0104】（基板101）基板として、異種基板に成長させた窒化物半導体、本実施例ではGaNを厚膜（ $100 \mu\text{m}$ ）で成長させた後、異種基板を除去して、 $80 \mu\text{m}$ のGaNからなる窒化物半導体基板を用いる。基板の詳しい形成方法は、以下の通りである。2インチφ、C面を主面とするサファイアよりなる異種基板をMOVPE反応容器内にセットし、温度を 500°C にして、トリメチルガリウム（TMG）、アンモニア（ NH_3 ）を用い、GaNよりなるバッファ層を 200 \AA の膜厚で成長させ、その後、温度を上げて、アンドープのGaNを $1.5 \mu\text{m}$ の膜厚で成長させて、下地層とする。次に、

下地層表面にストライプ状のマスクを複数形成して、マスク開口部（窓部）から窒化物半導体、本実施例ではGaNを選択成長させて、横方向の成長を伴った成長（ELOG）により成膜された窒化物半導体層を、さらに厚膜で成長させて、異種基板、バッファ層、下地層を除去して、窒化物半導体基板を得る。この時、選択成長時のマスクストライプは、 SiO_2 からなり、マスク厚 $0.1 \mu\text{m}$ 、マスク間隔 $20 \mu\text{m}$ 、開口部（窓部）幅 $8 \mu\text{m}$ で、GaN（1-100）方向とする。

【0105】（バッファ層102）上記GaN基板の上に、温度を 1050°C にして、TMG（トリメチルガリウム）、TMA（トリメチルアルミニウム）、アンモニアを用い、 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなるバッファ層102を $4 \mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。この層は、AlGaNのn型コンタクト層と、GaNからなる窒化物半導体基板との間で、バッファ層として機能する。次に、窒化物半導体からなる下地層の上に、素子構造となる各層を積層する。

【0106】（n側コンタクト層103）次に得られたバッファ層102上にTMG、TMA、アンモニア、不純物ガスとしてシランガスを用い、 1050°C でSiドーピングした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなるn型コンタクト層103を $5 \mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。

【0107】（クラック防止層104）次に、TMG、TMI（トリメチルインジウム）、アンモニア、不純物ガスとしてシランガスを用い、温度を 800°C にしてSiドーピングした $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ よりなるクラック防止層104を $0.15 \mu\text{m}$ の膜厚で成長させる。

【0108】（n側クラッド層105：下部クラッド層25）次に、温度を 1050°C にして、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニア、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドーピングした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなるA層を 25 \AA の膜厚で成長させ、続いて、不純物ガスを止め、アンドープの $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなるB層を 25 \AA の膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ100回繰り返してA層とB層の積層し、多層膜（超格子構造）よりなる膜厚 $0.5 \mu\text{m}$ のn型クラッド層106を成長させる。この時、アンドープAlGaNのAl混晶比としては、 0.05 以上 0.3 以下の範囲であれば、十分にクラッド層として機能する屈折率差を設けることができる。この時、n側クラッド層のAlの平均混晶比は 0.75 であり、図2（b）に示すように、n側クラッド層25のAl混晶比は、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層26よりも大きく、バンドギャップエネルギーの比較においても同様に、n側クラッド層25のバンドギャップエネルギーは、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層26よりも大きな構成となる。また、n型不純物濃度の比較において、n側クラッド層25のバンドギャップエネルギーは、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層26よりも大きな構成となる。また、n型不純物濃度の比較において、n側クラッド層25のバンドギャップエネルギーは、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層26よりも大きな構成となる。

ド層25、第1の障壁層2aが、光ガイド層よりも大きな構成となる。

【0109】(n側光ガイド層106：下部光ガイド層26)次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、アンドープのアンドープの $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなるn型光ガイド層106を $0.15\mu m$ の膜厚で成長させる。また、n型不純物をドーピングしてもよい。本発明ではこの層が第1の半導体層となる。また、本実施例のn側光ガイド層、活性層、キャリア閉込め層、p側光ガイド層は、図3(a)において、それぞれ、下部光ガイド層(第1の半導体層)26、活性層27、キャリア閉込め層28、上部光ガイド層(第2の半導体層)29に対応している。

【0110】(活性層107(27, 12))次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを $5 \times 10^{18}/cm^3$ ドーピングした $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ よりなる障壁層(第1の障壁層2a)を 100\AA の膜厚で、TMA及びシランガスを止め、アンドープのGaNよりなる井戸層1a(W)を 100\AA の膜厚で、最後の障壁層(第2の障壁層2b)として、アンドープの $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ を 150\AA の膜厚で、(B)/(W)/(B)の順に積層して、単一量子井戸構造の活性層とする。活性層107は、障壁層(B)、井戸層(W)を、(B)/(W)/(B)の積層体を繰り返し形成して、多重量子井戸構造(MQW)とすることもできる。この時、井戸層1aは、第1の障壁層2aよりもn型不純物濃度が小さく、第2の障壁層2bは第1の障壁層2aよりもn型不純物濃度が小さく、バンドギャップエネルギー、Al混晶比も小さく、膜厚が大きな構成となる。

【0111】(p側電子閉込め層108：キャリア閉込め層28)次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとして Cp_2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム)を用い、Mgを $1 \times 10^{19}/cm^3$ ドーピングした $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ よりなるp型電子閉込め層108を 100\AA の膜厚で成長させる。この層は、特に設けられていなくても良いが、設けることで電子閉込めとして機能し、閾値の低下に寄与するものとなる。

【0112】(p側光ガイド層109：上部光ガイド層29)次に、温度を $1050^\circ C$ にして、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、アンドープの $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなるp側光ガイド層109を $0.15\mu m$ の膜厚で成長させる。このp型光ガイド層109は、アンドープとして成長させるが、p型電子閉込め層108、p型クラッド層110等の隣接層からのMgの拡散により、Mg濃度が $5 \times 10^{16}/cm^3$ となりp型を示す。またこの層は成長時に意図的にMgをドーピングしても良い。この層が、第2の半導体層とな

る。

【0113】(p側クラッド層110：上部クラッド層30)続いて、TMAを止め、 Cp_2Mg を用いて、 $1050^\circ C$ でMgドーピング $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなる層を 25\AA の膜厚で成長させ、続いて、 Cp_2Mg を止め、アンドープ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ よりなる層を 25\AA の膜厚で成長させ、それを100回繰り返して総膜厚 $0.5\mu m$ の超格子層よりなるp型クラッド層110を成長させる。p型クラッド層は少なくとも一方がAlを含む窒化物半導体層を含み、互いにバンドギャップエネルギーが異なる窒化物半導体層を積層した超格子で作製した場合、不純物はいずれか一方の層に多くドーピングして、いわゆる変調ドーピングを行うと結晶性が良くなる傾向にあるが、両方に同じようにドーピングしても良い。p側クラッド層110を超格子構造とすることによって、クラッド層全体のAl混晶比を上げることができるので、クラッド層自体の屈折率が小さくなり、さらにバンドギャップエネルギーが大きくなるので、閾値を低下させる上で非常に有効である。さらに、超格子としたことにより、クラッド層自体に発生するピットが超格子にしないものよりも少なく、ショートが発生も低くなる。この時、n側クラッド層と同様に、Alの平均混晶比は0.75であり、図2(b)に示すように、p側クラッド層30のAl混晶比は、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層29よりも大きく、バンドギャップエネルギーの比較においても同様に、p側クラッド層30のバンドギャップエネルギーは、第1の障壁層2aよりも小さく、第2の障壁層2bよりも大きく、光ガイド層29よりも大きな構成となる。また、p型不純物濃度の比較において、キャリア閉込め層28が、p側クラッド層30よりも大きく、p側クラッド層30が、光ガイド層29よりも大きく、第2の障壁層2b、光ガイド層29にはキャリア閉込め層28からの不純物拡散により低濃度でドーピングされた、若しくはアンドープの構成となる。

【0114】(p側コンタクト層111)最後に、 $1050^\circ C$ で、p型クラッド層110の上に、Mgを $1 \times 10^{20}/cm^3$ ドーピングしたp型GaNよりなるp型コンタクト層111を 150\AA の膜厚で成長させる。p型コンタクト層111はp型の $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x, 0 \leq y, x+y \leq 1$)で構成することができ、好ましくはMgをドーピングしたGaNとすれば、p電極120と最も好ましいオーミック接触が得られる。コンタクト層111は電極を形成する層であるので、 $1 \times 10^{17}/cm^3$ 以上の高キャリア濃度とすることが望ましい。 $1 \times 10^{17}/cm^3$ よりも低いと電極と好ましいオーミックを得るのが難しくなる傾向にある。さらにコンタクト層の組成をGaNとすると、電極材料と好ましいオーミックが得られやすくなる。反応終了後、反応容器内において、ウエハを窒素雰囲気中、 $700^\circ C$ で

アニーリングを行い、p型層を更に低抵抗化する。このように、各層が積層された素子構造は、図2(a)に示す積層体となり、また図2(b)に示すようなAl混晶比を有する素子構造となる。具体的には、第1の障壁層2aよりもAl混晶比の小さく、井戸層1aよりもAl混晶比の大きい、Al平均組成を有するn側クラッド層26、p側クラッド層が、活性層、光ガイド層26、29を挟んで設けられ、またn側光ガイド層26、p側光ガイド層29のAl混晶比も、第1の障壁層2aよりもAl混晶比より小さく、井戸層1aよりもAl混晶比より大きい窒化物半導体で形成されている。さらにまた、クラッド層25、30のAl混晶比は光ガイド層26、29よりも大きく、光ガイド層26、29のAl混晶比は、第2の障壁層2bよりも小さい窒化物半導体で形成されている。

【0115】以上のようにして窒化物半導体を成長させ各層を積層した後、ウエハを反応容器から取り出し、最上層のp型コンタクト層の表面に SiO_2 よりなる保護膜を形成して、RIE（反応性イオンエッチング）を用い SiCl_4 ガスによりエッチングし、図1に示すように、n電極を形成すべきn型コンタクト層103の表面を露出させる。このように窒化物半導体を深くエッチングするには保護膜として SiO_2 が最適である。

【0116】次に上述したストライプ状の導波路領域として、リッジストライプを形成する。まず、最上層のp型コンタクト層（上部コンタクト層）のほぼ全面に、PVD装置により、 Si 酸化物（主として、 SiO_2 ）よりなる第1の保護膜161を0.5 μm の膜厚で形成した後、第1の保護膜161の上に所定の形状のマスクをかけ、RIE（反応性イオンエッチング）装置により、 CF_4 ガスを用い、フォトリソグラフィ技術によりストライプ幅1.6 μm の第1の保護膜161とする。この時、リッジストライプの高さ（エッチング深さ）は、p型コンタクト層111、およびp型クラッド層109、p型光ガイド層110の一部をエッチングして、p型光ガイド層109の膜厚が0.1 μm となる深さまでエッチングして、形成する。

【0117】次に、リッジストライプ形成後、第1の保護膜161の上から、 Zr 酸化物（主として ZrO_2 ）よりなる第2の保護膜162を、第1の保護膜161の上と、エッチングにより露出されたp型光ガイド層109の上に0.5 μm の膜厚で連続して形成する。

【0118】第2の保護膜162形成後、ウエハを600℃で熱処理する。このように SiO_2 以外の材料を第2の保護膜として形成した場合、第2の保護膜成膜後に、300℃以上、好ましくは400℃以上、窒化物半導体の分解温度以下（1200℃）で熱処理することにより、第2の保護膜が第1の保護膜の溶解材料（フッ酸）に対して溶解しにくくなるため、この工程を加えることがさらに望ましい。

【0119】次に、ウエハをフッ酸に浸漬し、第1の保護膜161をリフトオフ法により除去する。このことにより、p型コンタクト層111の上に設けられていた第1の保護膜161が除去されて、p型コンタクト層が露出される。以上のようにして、図1に示すように、リッジストライプの側面、及びそれに連続する平面（p型光ガイド層109の露出面）に第2の保護膜162が形成される。

【0120】このように、p型コンタクト層112の上に設けられた第1の保護膜161が、除去された後、図1に示すように、その露出したp型コンタクト層111の表面に Ni/Au よりなるp電極120を形成する。但しp電極120は100 μm のストライプ幅として、図1に示すように、第2の保護膜162の上に渡って形成する。第2の保護膜162形成後、既に露出させたn型コンタクト層103の表面には Ti/Al よりなるストライプ状のn電極121をストライプと平行な方向で形成する。

【0121】次に、n電極を形成するためにエッチングして露出された面でp、n電極に、取り出し電極を設けるため所望の領域にマスクし、 SiO_2 と ZrO_2 よりなる誘電体多層膜164を設けた後、p、n電極上に Ni-Ti-Au （1000Å-1000Å-8000Å）よりなる取り出し（パッド）電極122、123をそれぞれ設けた。この時、活性層107の幅は、200 μm の幅（共振器方向に垂直な方向の幅）であり、共振器面（反射面側）にも SiO_2 と ZrO_2 よりなる誘電体多層膜が設けられる。

【0122】以上のようにして、n電極とp電極とを形成した後、ストライプ状の電極に垂直な方向で、窒化物半導体のM面（ GaN のM面、（11-00）など）でバー状に分割して、更にバー状のウエハを分割してレーザ素子を得る。この時、共振器長は、600 μm である。

【0123】室温においてしきい値電流 I_{th} が61mA、電流密度 J_{th} が3.8kA/cm²、発振波長369nmの連続発振のレーザ素子が得られ、室温での連続発振条件下における素子の推定寿命は約4000時間のレーザ素子が得られる。

【0124】〔実施例2〕実施例1において、活性層を以下の通りとする他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。

【0125】（活性層107（27，12）） Si ドーパ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 、膜厚150Åからなる第1の障壁層2a、アンドープ GaN 、膜厚100Åからなる井戸層1b、アンドープ $\text{Al}_{1-u}\text{Ga}_{1-u}\text{N}$ 、膜厚d（Å）からなる第2の障壁層2bを順に積層した単一量子井戸構造の活性層とする。

【0126】第2の障壁層のAl混晶比uを0.05（実施例1と同じAl混晶比）、0.1、0.15（比

較例)である場合において、第2の障壁層の膜厚変化に対する閾値電流、第2の障壁層の膜厚変化に対する素子寿命、をそれぞれ図9、10に示す。図9に示す第2の障壁層の膜厚変化に対する閾値電流変化は、第2の障壁層のA1混晶比 $u=0.05$ の時をグラフa、 $u=0.1$ の時の変化をグラフb、 $u=0.15$ (比較例)の時の変化をグラフcとして示す。また図10に示す第2の障壁層の膜厚変化に対する素子寿命変化は、第2の障壁層のA1混晶比 $u=0.05$ の時をグラフd、 $u=0.1$ の時の変化をグラフe、 $u=0.15$ (比較例)の時の変化をグラフfとして示す。この時、膜厚 d は、 $d=50\text{Å}$ 、 100Å 、 150Å で変化させて、各特性を評価する。

【0127】図9に観られるように、第2の障壁層のA1混晶比 u を 0.05 (実施例1と同じ)とした場合に、実施例1と同じ膜厚 150Å の他に、膜厚を 50Å 、 100Å と変化させても閾値電流 I_{th} にほとんど変化がみられないレーザ素子となる。一方、図10に示すように、第2の障壁層のA1混晶比 u を 0.05 (実施例1と同じ)とした場合に、実施例1と同じ膜厚 150Å の他に、膜厚を変化させると、図からわかるように、素子寿命が大きく変化し、第1の障壁層とほぼ同じ膜厚 100Å の場合に、約半分の素子寿命となり、第1の障壁層より膜厚の小さい膜厚 50Å の場合に、更に半分の素子寿命となる傾向が観られる。従って、実施例1に示すように第2の障壁層のA1混晶比 u が、第1の障壁層よりも小さい場合において、第2の障壁層の膜厚に対して、閾値電流はほとんど変化しない傾向にあるが、素子寿命は第1の障壁層とほぼ同じ膜厚若しくはそれよりも小さい場合に比べて、第1の障壁層よりも第2の障壁層の膜厚を大きくした場合に、急激に素子寿命が向上する傾向が観られる。

【0128】次に、第2の障壁層のA1混晶比 u が 0.1 の場合において、 $u=0.05$ の場合とは異なり、膜厚 d が大きくなるにつれて、図9のグラフbとして示すように、閾値電流 I_{th} が上昇する傾向が観られ、一方、素子寿命については、図10のグラフeとして示すように、膜厚 d が大きくなるにつれて、素子寿命の減少傾向が観られる。これは、 $u=0.05$ の場合と異なり、A1混晶比が大きくなったことで、オフセットが大きくなり、特に、第2の半導体層とのオフセットが大きくなったことで、第2導電型層からのキャリア注入効率が低下したためと考えられる。すなわち、第2の半導体層(p側光ガイド層)よりも大きなA1混晶比の窒化物半導体で形成され、第2の障壁層2bが第2の半導体層よりもバンドギャップエネルギーが大きくなることで、図3(b)に示すように、 $u=0.05$ の第2の障壁層と第2の半導体層とほぼ同じA1混晶比、バンドギャップエネルギーである場合に比べて、より大きなオフセットが形成されて、閾値電流の上昇傾向を生みだしている

と考えられる。また、井戸層がGaInNであるので、A1を含む窒化物半導体から成る第2の障壁層が形成されると、熱膨張係数差により、強い応力が掛かり、A1混晶比 u が、 0.1 と大きくなることで、結晶性悪化による閾値の上昇、素子寿命の低下への影響も大きいと考えられる。特に、膜厚が大きくなることで、閾値電流が上昇していることから、結晶性の悪化による影響が大きくなっているものと考えられる。また、上述したように、第2の障壁層には、キャリア閉込め層から井戸層を離すためのスペーサーとしての機能があることを説明したが、 $u=0.1$ では、第2の障壁層による結晶性悪化によりスペーサーとしての機能も悪化したものと考えられ、また、第2の障壁層のA1混晶比が大きくなったことで、pn接合部にあるキャリア閉込め層ほどに影響がないと考えられるものの層が高抵抗化したことによる影響も出ていると考えられる。

【0129】次に、比較例として、第2の障壁層のA1混晶比が、第1の障壁層とほぼ同じ、 0.15 である場合には、図9のグラフcとして閾値電流変化を示すが、膜厚が大きくなることで、急激に閾値電流が上昇する傾向が観られ、これは、結晶性悪化と、オフセットが大きくなったことが相乗的に作用して、 $u=0.1$ である場合と比較して、急激な上昇傾向となって現れたものと考えられる。また、図10のグラフfとして素子寿命変化を示すように、 $u=0.1$ である場合に比べて、更に減少する傾向が観られ、結晶性悪化とバンドオフセットの変化による相乗作用によるものと考えられる。

【0130】【実施例3】実施例1において、活性層を以下の通りとする他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。

【0131】(活性層107(27,12))SiドープAl_{0.15}Ga_{0.85}N、膜厚200Åからなる第1の障壁層2a、アンドープAl_{0.04}In_{0.02}Ga_{0.94}N、膜厚100Åからなる井戸層1b、アンドープAl_{0.05}Ga_{0.85}N、膜厚150Åからなる第2の障壁層2bを順に積層した単一量子井戸構造の活性層とする。

【0132】得られるレーザ素子は、実施例1に比較して、井戸層に4元混晶AlInGaInを用いたが、発振波長はほぼ同じ370nmで室温にて連続発振し、A1とInの成長時の反応により、結晶性が悪化していると考えられるもののInを含むことにより発光効率が向上していると考えられ、閾値電流は50mAと実施例1よりも低いレーザ素子が得られる傾向にある。素子寿命については、実施例1とほぼ同等のものが得られる傾向にある。

【0133】【実施例4】実施例1において、活性層を以下の通りとする他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。

【0134】(活性層107(27,12))Siドープ

ブ $\text{Al}_{0.15}\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 、膜厚 200 Å からなる第 1 の障壁層 2 a、アンドープ $\text{Al}_{0.04}\text{In}_{0.02}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 、膜厚 100 Å からなる井戸層 1 b、アンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 、膜厚 150 Å からなる第 2 の障壁層 2 b を順に積層した単一量子井戸構造の活性層とする。

【0135】得られるレーザ素子は、実施例 1、3 に比べて、閾値電流が僅かながら大きくなる傾向にあり、また素子寿命も僅かながら小さくなる傾向が観られる。これは、障壁層と井戸層の全てに 4 元混晶の AlInGaN を用いたことにより、上述した In と Al の反応による結晶性悪化の影響が実施例 3 よりも大きくなることによるものと考えられる。しかし一方で、実施例 1～3 と異なり、4 元混晶の AlInGaN を用いたことにより、障壁層を AlGaN とした実施例 1～3 と異なり、ウエハ面内における各素子チップの特性のばらつきが小さくなる傾向が観られ、製造における歩留まりが向上する傾向が得られる。これは、 AlGaN を用いる場合よりも 4 元混晶の AlInGaN を井戸層、障壁層に用いる方が、面内に均一な膜形成が実現されているものと考えられる。

【0136】【実施例 5】実施例 1 において、活性層を以下の通りとする他は、実施例 1 と同様にしてレーザ素子を得る。

【0137】（活性層 107 (27, 12)） Si ドープ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 、膜厚 200 Å からなる第 1 の障壁層 2 a、アンドープ $\text{Al}_{0.02}\text{Ga}_{0.98}\text{N}$ 、膜厚 100 Å からなる井戸層 1 b、アンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 、膜厚 150 Å からなる第 2 の障壁層 2 b を順に積層した単一量子井戸構造の活性層とする。

【0138】得られるレーザ素子は、井戸層のバンドギャップエネルギーが大きくなったことにより、実施例 1～3 に比較して、発振波長が短くなるが、閾値電流が上昇する傾向にあり、また素子寿命も低くなる傾向がある。これは、井戸層の Al 混晶比を大きくしたことにより、第 2 の障壁層とのバンドオフセットが小さくなり、第 1 導電型層からのキャリアが井戸層内に閉じ込められる効率が低下したためと考えられる。また、実施例 3 と比較して、ウエハ面内における素子チップの特性にばらつきが大きく、4 元混晶の AlInGaN を井戸層に用いる場合に比べて、ウエハ面内の膜形成にばらつきが発生しているためと考えられる。従って、井戸層、第 1 の障壁層、第 2 の障壁層のいずれかに、 In と Al とを含む窒化物半導体を用いることで、歩留まりに優れる半導体素子が得られ、更に好ましくは、上記層の内、少なくとも井戸層が In と Al とを含む窒化物半導体からなる層とすることで、発光効率を高めて、歩留まりの向上が図れる。

【0139】【実施例 6】実施例 1 において、 n 側光ガイド層、 p 側光ガイド層の組成を $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ とする他は、実施例 1 と同様にしてレーザ素子を得る。

【0140】 $x=0.15$ とし、第 2 の障壁層とほぼ同じ Al 混晶比、ほぼ同じバンドギャップエネルギーとすることで、第 2 導電型層（第 2 の半導体層）からのキャリア注入における第 2 の障壁層とのバンドオフセットが小さくなるものの、図 3 (b)、図 5 (a) 及び図 5 (b) に示すように、 p n 接合部をまたがって注入されることからオフセットが小さくなることによる注入効率への寄与は小さい傾向にある。一方で、光ガイド層のように素子内で厚膜の層の Al 混晶比を大きくすることで、上記実施例 2 のように障壁層、井戸層を膜厚の小さい層の場合と異なり、結晶性悪化が大きく、素子特性、閾値電流の上昇、素子寿命の低下が観られる。光ガイド層の Al 混晶比 x を大きくすると更にその傾向が大きくなり、更に Al 混晶比 x を、第 1 の障壁層の Al 混晶比より大きくするとその傾向が強くなり素子特性が大きく低下する傾向にある。本発明では、実施例 1～3 に示すように、第 1 の半導体層、第 2 の半導体層のバンドギャップエネルギーを小さくし、特に短波長系の窒化物半導体においては、バンドギャップエネルギーを小さくして Al 混晶比を小さくすることが素子特性の向上につながる傾向が観られる。

【0141】【実施例 7】実施例 1 において、活性層内の各層を以下のようにする他は、実施例 1 と同様にして、レーザ素子を得る。

【0142】第 1 の障壁層をアンドープで形成してその他は実施例 1 と同じ活性層とした場合、閾値電流が 113 mA と大きくなる傾向が観られ、第 1 の障壁層には n 型不純物がドーピングされていることが閾値電流の低いレーザ素子が得られる傾向にある。

【0143】井戸層を Si ドープで形成してその他は実施例 1 と同じ活性層とした場合、ウエハ当たりのレーザ発振を示さない素子の数が多くなり、レーザ素子においては、井戸層をアンドープの方が好ましい傾向にある。

【0144】図 5 (a) に示すように、多重量子井戸の活性層として、 Si ドープ $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 、100 Å の第 1 の障壁層 2 a、アンドープ GaN 、50 Å の井戸層 1 a、 Si ドープ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 、100 Å の内部障壁層 2 c、アンドープ GaN 、50 Å の井戸層 1 b、アンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 、150 Å の第 2 の障壁層 2 b を積層してレーザ素子を得ると、実施例 1 よりも閾値電流が上昇する傾向にあるが良好なレーザ素子が得られる。これは、内部障壁層が設けられたことで、 AlGaN 障壁層による内部応力、強い圧電界により井戸層の機能が低下する傾向にあるためであると考えられる。また、図 5 (a) に示すように、第 1 の障壁層 2 a よりも内部障壁層 2 c

A1 混晶比を大きくすると、その傾向が顕著となり、A1を含む窒化物半導体による結晶性悪化の影響も加わって、素子特性が大きく悪化する傾向にある。一方で、内部障壁層2cを、図5(b)に示すように、第2の障壁層2bよりもA1混晶比を小さくして、バンドギャップエネルギーを小さくすると、上述したように、内部障壁層と井戸層とのオフセットが小さくなり、各井戸層への分配機能が低下し、一方で、A1を含む窒化物半導体層を設けることによる上述した悪影響が加わるため、内部障壁層のバンドギャップエネルギーが第2の障壁層より大きく、第1の障壁層より小さい場合に比べて、素子特性が悪化する傾向にある。

【0145】〔実施例8〕実施例1において、図8

(a)に示すように、光ガイド層を以下のように組成傾斜させて形成する他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。

【0146】(n側光ガイド層106(第1の光ガイド層26)) $Al_xGa_{1-x}N$ を膜厚0.15 μm で形成し、この時、成長するに従って、すなわち活性層に近づくに従って、A1組成比xを、0.1から0.02へと変化させて、膜厚方向に組成傾斜させたn側光ガイド層106を設ける。この時、n側光ガイド層は、最初の膜厚0.1 μm の領域(高濃度不純物領域)はSiドープで形成し、残りの膜厚0.05 μm の領域(活性層側50nmの領域、低濃度不純物領域)でアンドープで形成する。ここでは、活性層近傍の光ガイド層において、第1の障壁層よりもバンドギャップエネルギーの小さい一部の領域が、第1の半導体層となる。

【0147】(p側光ガイド層109(第2の光ガイド層29)) $Al_xGa_{1-x}N$ を膜厚0.15 μm で形成し、この時、成長するに従ってA1組成比xを、0.02から0.1へと変化させて、膜厚方向に組成傾斜させ、活性層に近づくに従ってA1混晶比が小さく、バンドギャップエネルギーが小さくしたp側光ガイド層109を設ける。ここで、p側光ガイド層は、最初の膜厚0.05 μm (活性層側0.05 μm の領域、(低濃度不純物領域))はアンドープで形成し、残りの膜厚0.1 μm の領域ではMgドープで形成する。この時、活性層及びp側電子閉込め層近傍のp側光ガイド層29において、第2の障壁層よりもA1混晶比が小さく、バンドギャップエネルギーの小さい一部の領域が、第2の半導体層となる。

【0148】得られるレーザ素子は、実施例1に比較して、A1の平均組成はほぼ同じものの、図8(a)に示すように、バンドギャップエネルギーが傾斜された光ガイド層を設けることにより、キャリアの活性層への注入効率が良好となり、内部量子効率が向上する傾向にある。また、光ガイド層内の活性層に近い側(活性層側)にアンドープ領域(低濃度不純物領域)を設けたため、不純物ドープしたことによる光の損失が低く抑えられた

導波路構造となり、閾値電流密度が減少する傾向にある。

【0149】〔実施例9〕実施例1において、活性層を以下の通りとする他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。

(活性層107(27,12)) Siドープ $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 、膜厚75Åからなる第1の障壁層2a、アンドープ $In_{0.02}Ga_{0.98}N$ 、膜厚100Åからなる井戸層1b、アンドープ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ 、膜厚45Åからなる第2の障壁層2bを順に積層した単一量子井戸構造の活性層とする。室温において発振波長371nm、しきい値電流 I_{th} が30mAの連続発振のレーザ素子が得られる。

【0150】〔実施例10〕実施例1において、活性層を以下の通りとする他は、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。多重量子井戸の活性層として、Siドープ $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ 、75Åの第1の障壁層2a、アンドープ $In_{0.02}Ga_{0.98}N$ 、50Åの井戸層1a、Siドープ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ 、50Åの内部障壁層2c、アンドープ $In_{0.02}Ga_{0.98}N$ 、50Åの井戸層1b、アンドープ $Al_{0.1}Ga_{0.9}N$ 、50Åの第2の障壁層2bを積層してレーザ素子を得る。室温において発振波長371nm、しきい値電流 I_{th} が30mAの連続発振のレーザ素子が得られる。

【0151】〔実施例11〕図6(b)を元に本発明の発光素子200について説明する。ここでは、200bに示すように、基板の同一面側に、正負一對の電極を設ける構造の発光素子を作製する。

【0152】サファイア(C面)よりなる基板201をMOVPEの反応容器内にセットし、水素を流しながら、基板の温度を1050℃まで上昇させ、基板のクリーニングを行う。バッファ層(図示せず):続いて、温度を510℃で、基板1上にGa_{0.95}Nよりなる低温成長のバッファ層を約100Åの膜厚で成長させる。この低温成長層を次に成長させる層よりも低温で成長させて、基板との格子不整合を緩和させるものであり、基板の種類によっては省略できる。下地層(図示せず):バッファ層成長後、温度1050℃で、アンドープGa_{0.95}N層を1.5 μm の膜厚で成長させる。この層は、アンドープ層で成長させることで、その上に形成する素子構造の下地層となり、成長基板となる。n型コンタクト層202:続いて1050℃で、Siを $4.5 \times 10^{18}/cm^3$ ドープした $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなるn型コンタクト層(電流注入層)202を2 μm の膜厚で成長させる。ここでは、n側コンタクト層202が第1の半導体層となる。活性層203:アンドープ $Al_{0.15}Ga_{0.85}N$ よりなる障壁層(第1の障壁層2a)を100Åの膜厚で成長させ、続いてアンドープ $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ よりなる井戸層を30Åの

膜厚で成長させる。続いて、膜厚30Å、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ からなる内部障壁層（図示せず）を成長させ、井戸層1を4層（図示せず）と、内部障壁層を3層（図示せず）と、を交互に積層して、最後に第2の障壁層2bとして、膜厚40Åの $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ を成長させ、総膜厚380Åの多重量子井戸構造よりなる活性層203を成長させる。この活性層では、図5

(b)に示すように、第1の障壁層2aよりも、Al混晶比が小さく、バンドギャップエネルギーが小さく、第2の障壁層2bよりもAl混晶比が大きく、バンドギャップエネルギーが大きい、内部障壁層（2bなど）を形成した構造である。p側クラッド層204：アンドープの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ よりなるA層204を40Åの膜厚で成長させ、続いてMgを $5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなるB層205を25Åの膜厚で成長させる。そしてこれらの操作を繰り返し、A層、B層の順で交互に5層ずつ積層し、最後にA層を40Åの膜厚で成長させた超格子構造の多層膜よりなるp側多層膜クラッド層204を365Åの膜厚で成長させる。この時、最初のB層が第2の障壁層よりもバンドギャップエネルギーが小さく、Al混晶比の小さい第2の半導体層となる。p側コンタクト層205：続いて、Mgを $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ ドープしたGa_{0.95}Nよりなるp型コンタクト層205を200Åの膜厚で成長させる。

【0153】反応終了後、温度を室温まで下げ、さらに窒素雰囲気中、ウェーハを反応容器内において、700℃でアニーリングを行い、p型層をさらに低抵抗化する。

【0154】アニーリング後、ウェーハを反応容器から取り出し、最上層のp側コンタクト層205の表面に所定の形状のマスクを形成し、RIE（反応性イオンエッチング）装置でp側コンタクト層205側からエッチングを行い、図6（b）に示すようにn側コンタクト層202の表面を露出させる。

【0155】エッチング後、最上層にあるp側コンタクト層205のはほぼ全面に膜厚200ÅのNiとAuを含む透光性のp電極206と、そのp電極206の上にボンディング用のAuよりなるpパッド電極（図示せず）を0.5μmの膜厚で形成する。一方、エッチングにより露出させたn側コンタクト層202の表面にはWとAlを含むn電極207を形成してLED素子とした。

【0156】このLED素子は波長360nmの紫外発光を示し、特に、上記第2の障壁層を設けることで、結晶性良く活性層が形成でき、発光特性に優れる発光素子が得られる。

【0157】〔比較例1〕上記実施例2で示したように、実施例1において、第2の障壁層のAl混晶比uを、第1の障壁層と同じ0.15として、図9、10に、それぞれグラフcとグラフfとして示すように、膜

厚変化に対する閾値電流変化と、素子寿命変化を測定した。

【0158】

【発明の効果】本発明の窒化物半導体素子は、低い閾値電流で375nm以下という短波長の発光素子、レーザ素子を得ることができる。したがって、発光ダイオードは紫外域で励起する蛍光体と組み合わせて蛍光ランプの代替品を提供することができる。他方、レーザ素子は優れたFWHMを示し、優れた解像度が得られる結果、ホトリソグラフの光源、光造形の光源として有用である。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施形態に係るレーザ素子構造を説明する模式断面図である。

【図2】 図2（a）は本発明の一実施形態に係る積層構造を説明する模式断面図であり、図2（b）は各層のAl組成比の関係を説明する図である。

【図3】 図3（a）は本発明の一実施形態に係る積層構造を説明する模式断面図であり、図3（b）は該積層構造に対応してバイアス状態のバンド構造を説明する模式図である。

【図4】 図4（a）及び図4（b）は、従来技術におけるレーザ素子のバイアス状態のバンド構造を説明する模式図である。

【図5】 図5（a）及び図5（b）は、本発明の一実施形態に係る素子におけるバイアス状態のバンド構造を説明する模式図である。

【図6】 図6（a）及び図6（b）は本発明の一実施形態に係る発光素子の積層構造を説明する模式断面図であり、図6（c）は各層のAl組成比の関係を説明する図である。

【図7】 従来技術におけるレーザ素子の積層構造に対応した各層のAl組成比の関係を説明する図である。

【図8】 図8（a）は本発明の一実施形態に係る素子におけるバンド構造41を示す模式図であり、図8

(b)～図8（d）は各層における各導電型の不純物濃度の各種例を示す模式図である。

【図9】 本発明の一実施形態であるレーザ素子において、第2の障壁層のAl混晶比と膜厚の変化に対する閾値電流 I_{th} の変化を示す模式図である。

【図10】 本発明の一実施形態であるレーザ素子において、第2の障壁層のAl混晶比と膜厚の変化に対する素子寿命の変化を示す模式図である。

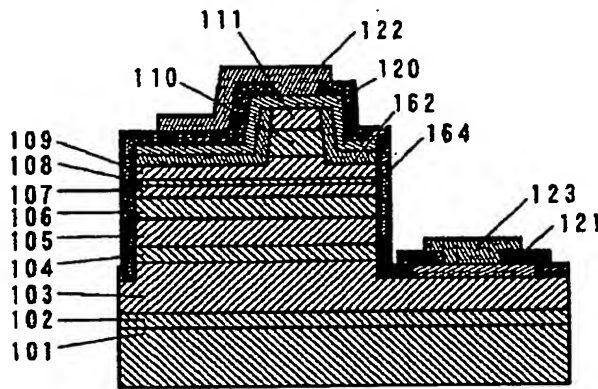
【符号の説明】

1・・・井戸層、2・・・障壁層、2a・・・第1の障壁層、2b・・・第2の障壁層、2c、2d・・・内部障壁層、11・・・第1導電型層、12・・・活性層、13・・・第2導電型層、25・・・下部クラッド、26・・・下部光ガイド層（第1の光ガイド層）、28・・・p側キャリア閉込め層、29・・・上部光ガイド層（第2の光ガイド層）、30・・・上部クラッド層、4

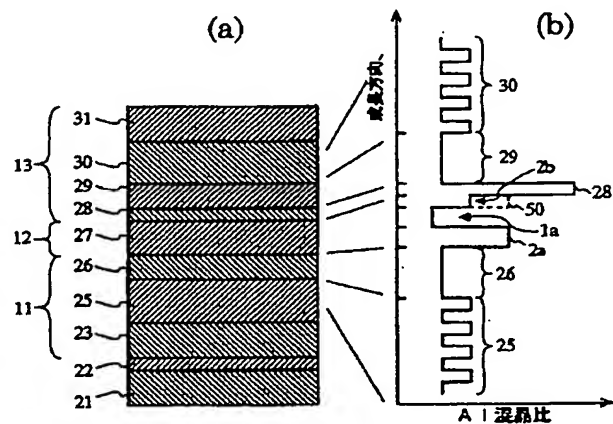
0・・・積層構造、41・・・バンド構造、50・・・従来の第2の障壁層におけるA1混晶比、51・・・本願の第2の障壁層のバンド構造におけるキャリアの注入経路、52・・・従来の第2の障壁層のバンド構造におけるキャリアの注入経路、53・・・従来の第2の障壁層のバンド構造、101・・・基板、102・・・バッファ層、103・・・n側コンタクト層、104・・・クラック防止層、105・・・n側クラッド層、106・・・n側光ガイド層、107、27・・・活性層、108・・・p側電子閉込め層、109・・・p側光ガイド

層、110・・・p側クラッド層、111・・・p側コンタクト層、120・・・p電極、121・・・n電極、122・・・pパッド電極、123・・・nパッド電極、162・・・第2の保護膜(埋込層)、164・・・絶縁膜、200・・・発光素子、201・・・基板、202・・・n側キャリア供給層、203・・・活性層、204・・・p側キャリア閉込め層、205・・・p側キャリア供給層、206・・・p電極、207・・・n電極

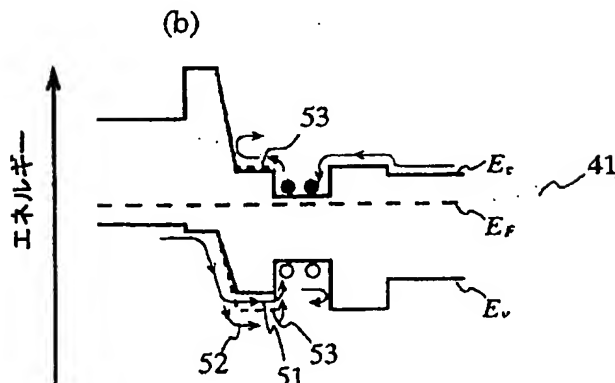
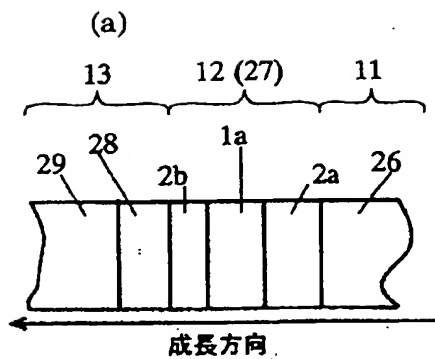
【図1】



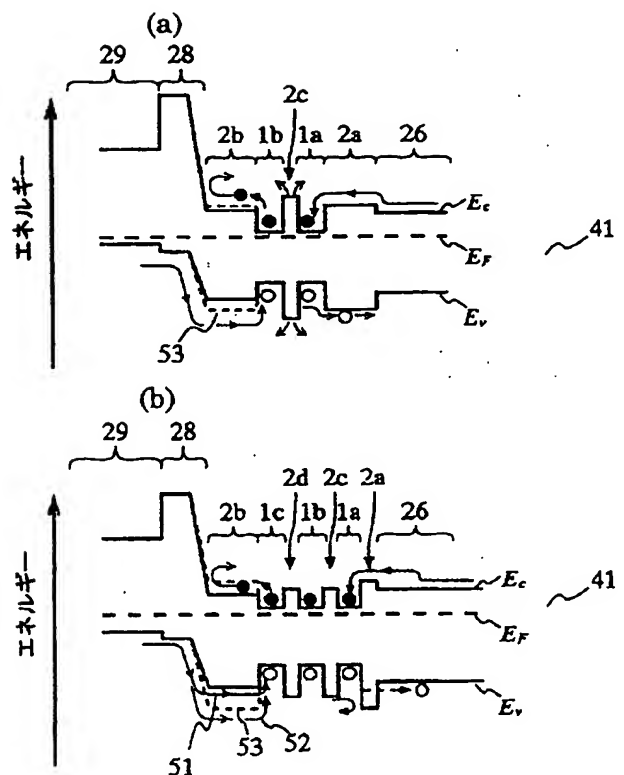
【図2】



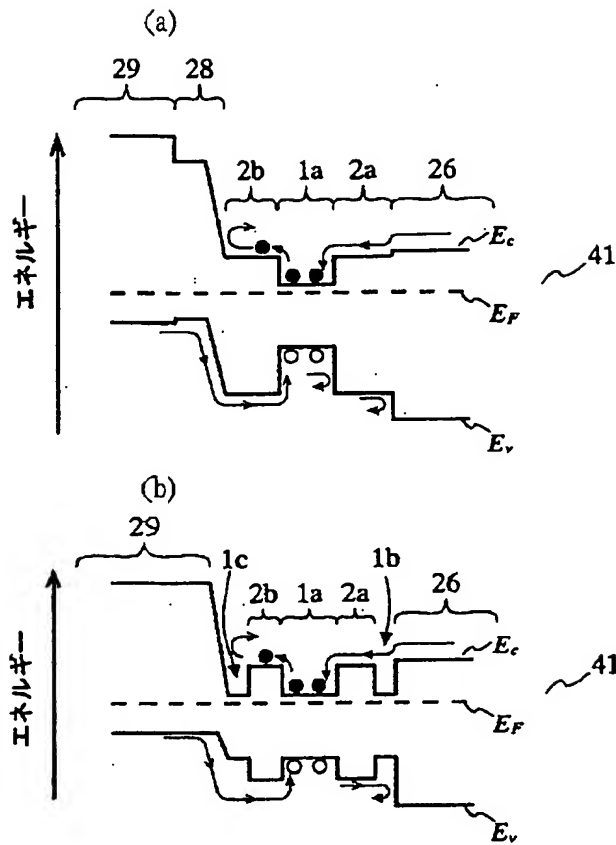
【図3】



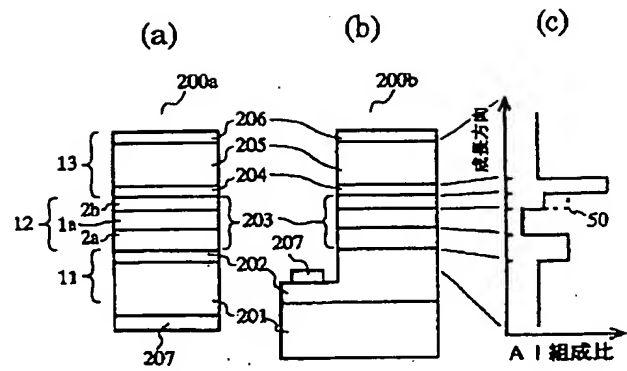
【図5】



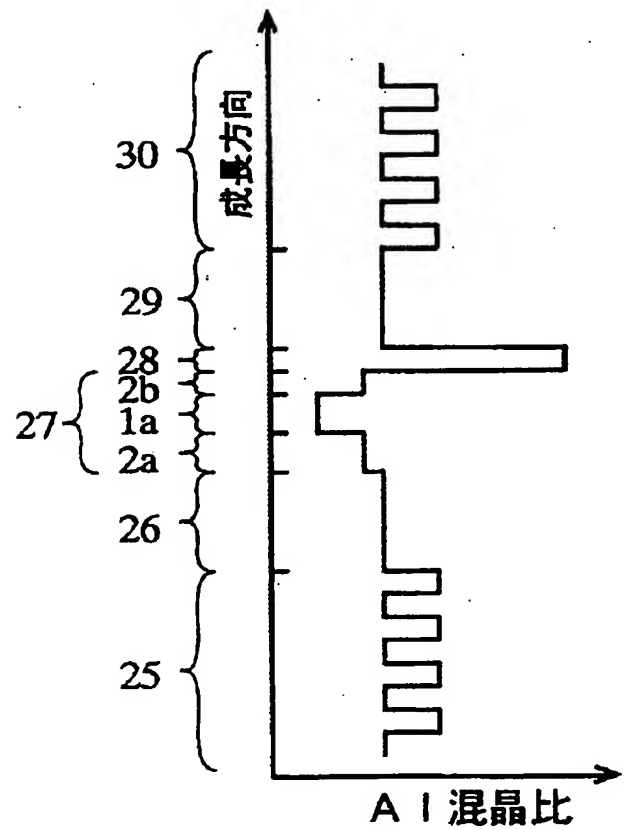
【図4】



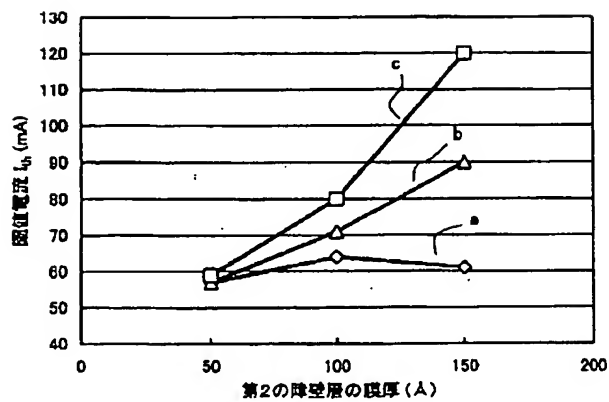
【図6】



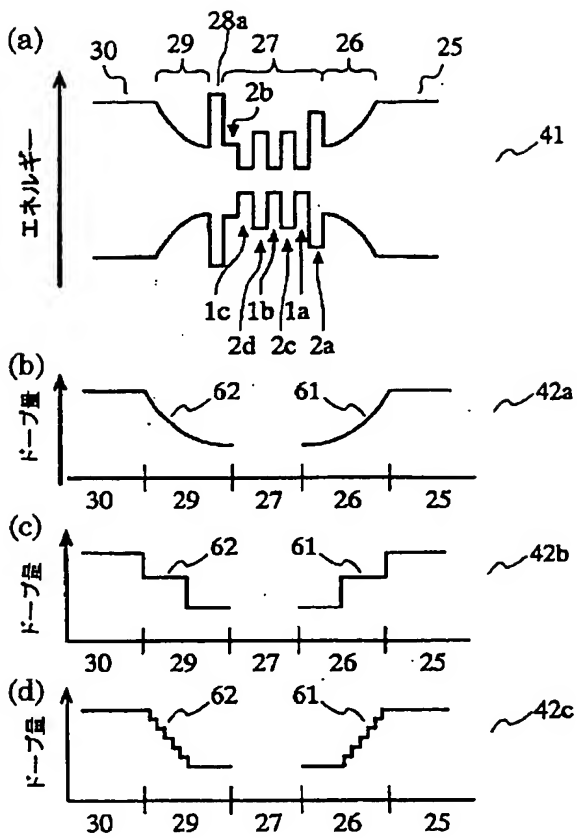
【図7】



【図9】



【図 8】



【図 10】

